

Optimierter Betrieb eines Talsperrenverbundsystems mit Anpassung an den Klimawandel

Von der
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines
Doktoringenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Martin Gocht
geboren am 25. September 1965
in Dolok Merangir

Eingereicht am 31.05.2013

Disputation am 06.08.2013

Berichterstatter Prof. Dr.-Ing. Günter Meon
Prof. Dr.-Ing. Axel Bronstert

(2013)

Danksagung

Ich danke Herrn Prof. Günter Meon für die Gelegenheit zur Promotion und die Betreuung der Arbeit in zahlreichen Gesprächen.

Ohne die Unterstützung meiner Kollegen wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Hier danke ich besonders Dr. Gerhard Riedel für die Entwicklung und die Unterstützung bei der Anwendung von PANTA RHEI. Dr. Kristian Förster danke ich für die Implementierung physikalisch basierter Ansätze in PANTA RHEI und hydrologische Fachgespräche. Marlene Gelleszun danke ich für Beratung und Hilfe in Matlab.

Anja Weber danke ich für die geduldige Mitarbeit am Modellaufbau. Thilmann Heinrich leistete wertvolle Unterstützung bei der Entwicklung regionaler Bevölkerungsprognosen, Katharina Klein unterstützte mich bei der Ermittlung des Hochwasserrisikos für Osterode im Harz.

Herrn Dr. Lange und Herrn Eggelsmann von den Harzwasserwerken danke ich für zahlreiche informative Gespräche über den Talsperrenverbund im Westharz und die Bereitstellung von Daten.

Dem Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur danke ich für die Finanzierung des Projektes im Rahmen des Forschungsverbundes Klimafolgenforschung in Niedersachsen KLIFF.

Meiner Familie danke ich für Liebe und Geduld, mit der sie mich nicht nur in diesem Lebensabschnitt unterstützte.

Inhalt

ZUSAMMENFASSUNG	1
SUMMARY	5
1 EINFÜHRUNG	9
1.1 PROBLEMSTELLUNG	9
1.2 ZIELSETZUNG	11
1.3 VORGEHENSWEISE UND STRUKTUR DER ARBEIT	12
2 DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET	15
2.1 HYDROGRAFISCHE VORAUSSETZUNGEN.....	16
2.2 GESCHICHTE DER WIRTSCHAFTLICHEN WASSERNUTZUNG IM WESTHARZ.....	18
2.2.1 <i>Teichwirtschaft</i>	18
2.2.2 <i>Talsperrenwirtschaft</i>	19
2.3 DISKUSSION.....	34
3 BEOBACHTUNG UND PROJEKTION DES KLIMAWANDELS	35
3.1 BEOBACHTETER KLIMAWANDEL.....	35
3.2 PROJEKTIONEN DES KLIMAWANDELS.....	38
3.3 EMISSIONSSZENARIEN ALS GRUNDLAGE FÜR DIE PROJEKTION DES KLIMAWANDELS	39
3.4 BEVÖLKERUNGSPROGNOSEN IM RAHMEN DER EMISSIONSSZENARIEN.....	41
3.4.1 <i>Globale Bevölkerungsprognosen</i>	41
3.4.2 <i>Regionale Bevölkerungsprognosen</i>	42
3.5 MODELLKETTEN ZUR MODELLIERUNG DES REGIONALEN KLIMAWANDELS	45
3.6 DAS GLOBALE ZIRKULATIONSMODELL ECHAM5/MPI-OM.....	47
3.7 REGIONALE KLIMAMODELLE.....	49
3.7.1 <i>REMO</i>	50
3.7.2 <i>WETTREG</i>	53
4 WASSERHAUSHALTSMODELLE ZUR SIMULATION DES EINFLUSSES VON KLIMAÄNDERUNGEN AUF SPEICHERSYSTEME	55
4.1 WASSERHAUSHALTSMODELLE	55
4.2 GÜTEMAßE	57
4.3 SKALENEFFEKTE	58
4.4 ZEITSTABILITÄT VON MODELLPARAMETERN	59
4.5 INTERNATIONALER ÜBERBLICK.....	60
4.5.1 <i>Asien</i>	60
4.5.2 <i>Amerika</i>	63
4.5.3 <i>Projekte in Deutschland und angrenzenden Ländern</i>	67
4.6 DISKUSSION.....	68
4.6.1 <i>Auswirkungen</i>	68
4.6.2 <i>Komplexität</i>	69
4.6.3 <i>Modellstruktur</i>	69
4.6.4 <i>Folgerungen für die vorliegende Arbeit</i>	69
4.7 DAS HYDROLOGISCHE MODELLSYSTEM PANTA RHEI	70
4.7.1 <i>Ansatz zur Modellierung des Wasserhaushalts</i>	71

4.7.2	Modellanpassungen für die Klimafolgenforschung	73
5	OPTIMIERUNG VON TALSPERRENVERBUNDSYSTEMEN.....	77
5.1	KLASSISCHE OPTIMIERUNGSSTRATEGIEN.....	77
5.1.1	Strukturiertes Ausprobieren	77
5.1.2	Lineares Programmieren	78
5.1.3	Dynamisches Programmieren	78
5.1.4	Nichtlineares Programmieren	79
5.2	POPULATIONSBASIERTE ALGORITHMEN	81
5.2.1	Biologisch motivierte Algorithmen	82
5.2.2	Genetische Algorithmen	82
5.3	DATENGETRIEBENE ANSÄTZE	83
5.3.1	Neuronale Netze.....	84
5.3.2	Stützvektormaschinen	85
5.4	DISKUSSION.....	85
6	EIN NEUES VERFAHREN DER EXPOSITIONSANALYSE FÜR DIE ERMITTLUNG DES HOCHWASSERRISIKOS 87	
6.1	WIRTSCHAFTLICHKEITSUNTERSUCHUNGEN IM HOCHWASSERSCHUTZ.....	87
6.2	ERMITTLUNG DES HOCHWASSERRISIKOS.....	88
6.2.1	Gefährdung	88
6.2.2	Vulnerabilität.....	89
6.3	VOLKSWIRTSCHAFTLICHE DATEN IN HOCHWASSERRISIKOANALYSEN	91
6.4	VOLKSWIRTSCHAFTLICHE GESAMTRECHNUNG	92
6.4.1	Gliederung ökonomischer Aktivitäten	93
6.4.2	Geographische Gliederung	94
6.5	DIE ESSENTIELLEN VOLKSWIRTSCHAFTLICHEN GRÖßEN	95
6.5.1	Das Anlagevermögen	95
6.5.2	Die Wertschöpfung.....	96
6.5.3	Die Erwerbstätigen.....	96
6.5.4	Die Kapitalintensität.....	96
6.6	FALLSTUDIE OSTERODE AM HARZ	97
6.6.1	Anwendung der Expositionsanalyse für die Fallstudie Osterode am Harz	97
6.6.2	Ermittlung der Gefährdung	100
6.6.3	Ermittlung der Vulnerabilität	102
6.6.4	Hochwasserrisiko in Osterode am Harz.....	102
6.7	DISKUSSION.....	104
7	AUFBAU EINES WASSERHAUSHALTSMODELLS FÜR DIE OPTIMIERUNG DES TALSPERRENBETRIEBS 105	
7.1	MODELLERSTELLUNG.....	105
7.1.1	Hydrografische Karte Niedersachsen	105
7.1.2	Teilgebiete und Teilflächen.....	106
7.1.3	Überarbeitung des Gewässernetzes.....	108
7.1.4	Automatisierte Generierung von Teilflächen.....	108
7.1.5	Ein hoch aufgelöster Teilflächendatensatz.....	112
7.1.6	Erstellung von Hydrotopen	114
7.1.7	Entwässerungsreihenfolge und Bauwerke	115
7.1.8	Diskussion.....	120

7.2	KALIBRIERUNG	120
7.2.1	<i>Kalibrierung mit Tageswerten für die Zeitreihe 1971-2000.....</i>	<i>121</i>
7.2.2	<i>Kalibrierung mit Stundenwerten der Zeitreihe 2000 – 2008</i>	<i>131</i>
7.2.3	<i>Validierung</i>	<i>141</i>
7.3	DISKUSSION: LANGZEITKONTINUUMSMODELL VERSUS ECHTZEITBETRIEBSSYSTEM	142
8	MODELLIERUNG MIT KLIMASZENARIEN.....	145
8.1	MODELLIERUNG DER VERGANGENHEIT MIT TAGESWERTEN AUS WETTREG 2006.....	145
8.2	MODELLIERUNG DER ZUKUNFT MIT TAGESWERTEN AUS WETTREG 2006.....	147
8.3	MODELLIERUNG DER VERGANGENHEIT MIT STUNDENWERTEN AUS REMO	150
8.3.1	<i>Talsperreninhalte</i>	<i>152</i>
8.3.2	<i>Trinkwasser- und Energieproduktion</i>	<i>153</i>
8.3.3	<i>Extremwerte</i>	<i>154</i>
8.4	MODELLIERUNG DER ZUKUNFT MIT STUNDENWERTEN AUS REMO	154
8.4.1	<i>Quartalsmittelwerte an den Zulaufpegeln</i>	<i>154</i>
8.4.2	<i>Extremwerte an den Zulaufpegeln</i>	<i>156</i>
8.5	DISKUSSION.....	157
9	OPTIMIERUNG DES TALSPERRENBETRIEBS.....	159
9.1	OPTIMIERUNG BEZÜGLICH DES HOCHWASSERSCHUTZES	160
9.2	EVALUIERUNG DER OPTIMIERUNG IM WASSERHAUSHALTSMODELL.....	165
9.3	DISKUSSION.....	169
10	SYNOPSIS.....	171
10.1	HOCHWASSERRISKO	171
10.2	TRINKWASSER- UND ENERGIEPRODUKTION	174
10.3	DISKUSSION.....	175
11	SCHLUSSFOLGERUNGEN	179
12	LITERATUR	183
13	ANHÄNGE	193

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1-1:	STRUKTUR DER ARBEIT: EIN HYDROLOGISCHER UND EIN ÖKONOMISCHER STRANG FÜHREN ZU EINER ABSCHLIEßENDEN SYNOPSE. WESENTLICHE EINGANGSDATEN SIND IN GRAUEN PFEILEN GEZEIGT. ZAHLEN IN DEN BAUSTEINEN WEISEN AUF DIE JEWEILIGEN UNTERKAPITEL HIN.	12
ABBILDUNG 2-1:	DAS TALSPERRENVERBUNDSYSTEM IM WESTHARZ. IM NORDEN BEFINDET SICH DER VERBUND AUS INNERSTE-, GRANE- UND OKERTALSPERRE MIT ÜBERLEITUNGEN VON DER RADAU BEI HARZBURG, AM SÜDWESTLICHEN HARZRAND DIE SÖSE- UND ODERTALSPERRE.	15
ABBILDUNG 2-2:	LANGJÄHRIGE MITTLERE NIEDERSCHLAGSVERTEILUNG IM WESTHARZ. DIE HÖCHSTEN NIEDERSCHLÄGE FALLEN ZWISCHEN BROCKEN UND BRUCHBERG. DATEN DER HARZWASSERWERKE FÜR DEN ZEITRAUM 1941-2010 (EGGELSMANN UND LANGE, 2011, VERÄNDERT).	17
ABBILDUNG 2-3:	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES TALSPERRENSYSTEMS IM WESTHARZ. EIN ÜBERLEITUNGSSYSTEM FASST INNERSTE-, GRANE- UND OKERTALSPERRE ZUR NORDGRUPPE ZUSAMMEN (MEON UND GOCHT, 2012, VERÄNDERT).	24
ABBILDUNG 2-4:	ÜBERLEITUNGEN IM VERBUND DER NORDGRUPPE, NICHT MAßSTÄBLICH. ¹ BIS GOSE/AB GOSE.	26
ABBILDUNG 2-5:	PLANUNGEN ZUM AUSBAU DES TALSPERRENSYSTEMS.	27
ABBILDUNG 2-6:	BETRIEBSPLAN DER SÖSETALSPERRE IN VEREINFACHTER DARSTELLUNG NACH UNTERLAGEN DER HARZWASSERWERKE GMBH).	28
ABBILDUNG 2-7:	LANGFRISTIGE ENTWICKLUNG WICHTIGER KENNZAHLEN DER HARZWASSERWERKE GMBH.	30
ABBILDUNG 2-8:	RELATIVE VERTEILUNG DER GESAMTLEISTUNG DER HARZWASSERWERKE IM JAHR 2010 (HWW 2011, VERÄNDERT).	31
ABBILDUNG 2-9:	TRINKWASSERPRODUKTION DER HARZWASSERWERKE SEIT 1935 (HWW, 2011).	31
ABBILDUNG 2-10:	ENERGIEPRODUKTION DER HARZWASSERWERKE SEIT 1990, MITTLERE JÄHRLICHE ENERGIEPRODUKTION 35,4 MIO KWH (HWW, 2011).	32
ABBILDUNG 2-11:	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER BETRIEBSEINRICHTUNGEN AN DER SÖSETALSPERRE.	33
ABBILDUNG 3-1:	KONZENTRATION VON TREIBHAUSGASEN IN DER ATMOSPHÄRE (IPCC, 2007).	37
ABBILDUNG 3-2:	ZEITLICHE ENTWICKLUNG DER CO ₂ -KONZENTRATIONEN UND DER TEMPERATUR GEMÄß BEOBACHTUNGEN (1850-2000) SOWIE IN DEN IPCC SZENARIEN A2, A1B UND B1 (JACOB ET AL., 2008).	40
ABBILDUNG 3-3:	BEVÖLKERUNGSPROGNOSEN. HISTORISCHE DATEN VON 1900 BIS 1999 UND PROJEKTIONEN (IPCC, 2000).	42
ABBILDUNG 3-4:	BEVÖLKERUNGSENTWICKLUNG NACH KREISEN IM EINZUGSGEBIET DER ALLER BIS 2030, EIGENE DARSTELLUNG AUF GRUNDLAGE VON DRIEFERT (2011) UND BUCHER ET AL (2009).	43
ABBILDUNG 3-5:	DEMOGRAFISCHE SZENARIEN FÜR NIEDERSACHSEN. EIGENE FORTSCHREIBUNG AUF GRUNDLAGE VON EISENMENGER ET AL. (2006) UND LUTZ ET AL. (1996).	44
ABBILDUNG 3-6:	MODELLKETTE ZUR ABSCHÄTZUNG DES KLIMAWANDEL-EINFLUSSES AUF DEN WASSERHAUSHALT.	46
ABBILDUNG 3-7:	MITTLERER JÄHRLICHER NIEDERSCHLAG IN CM DER ZEITREIHE 1980 - 1999, BEOBACHTET (CMAP), ALS MULTI-MODELL-MITTEL AUS 23 MODELLEN S (MEAN MODEL) UND ALS ERGEBNIS VON ECHAM5 MPI-OM (IPCC 2007). ...	48
ABBILDUNG 4-1:	INDEXFUNKTIONEN FÜR DIE MINIMALE TEMPERATUR(t_N), WASSERDAMPFDROCKDEFIZIT (i_{VPD}) UND MAXIMALE TAGESLÄNGE i_{TX} ALS EINGANGSDATEN FÜR DIE BERECHNUNG DES GSI (NACH JOLLY ET AL., 2005 IN FÖRSTER ET AL., 2012).	73
ABBILDUNG 4-2:	ZEITREIHE DES AUS BEOBACHTUNGSDATEN BERECHNETEN GSI FÜR DIE KLIMASTATION GÖTTINGEN IM JAHR 2005 UND WERTE DES NDVI (FÖRSTER ET AL., 2012).	74
ABBILDUNG 4-3:	VEREINFACHTES ABLAUFDIAGRAMM DES SCHNEEMODELLS NACH ANDERSON (1973).	75
ABBILDUNG 5-1:	OPTIMIEREN DURCH STRUKTURIERTES AUSPROBIEREN.	78
ABBILDUNG 5-2:	ROTATIONS- PARABEL IM DREIDIMENSIONALEN RAUM (BÄCK, 1995).	80
ABBILDUNG 5-3:	FUNKTION NACH HIMMELBLAU IM DREIDIMENSIONALEN RAUM (HIMMELBLAU, 1972).	80

ABBILDUNG 6-1:	MITTLERE SCHÄDIGUNGSGRAD FÜR DEN GEWERBLICHEN UND PRIVATEN BEREICH. SCHÄDEN AN GEBÄUDEN (OBEN) UND AN BETRIEBSEINRICHTUNGEN BZW. HAUSRAT (UNTEN) (THIEKEN ET AL., 2010).....	90
ABBILDUNG 6-2:	DAUER DER BETRIEBSUNTERBRECHUNG IN TAGEN IN ABHÄNGIGKEIT DES WASSERSTANDES. MITTELWERT, MEDIAN, SOWIE 25%- UND 75%-PERZENTIL (FEHLERBALKEN) NACH (THIEKEN ET AL., 2010).....	90
ABBILDUNG 6-3:	EINGANGSDATEN FÜR DIE DISAGGREGIERUNG DES ANLAGEVERMÖGENS UND DER ERWERBSTÄTIGEN AUF DIE ZIELEBENE NUTS 3 NACH AKTIVITÄTEN A-O.	95
ABBILDUNG 6-4:	DISAGGREGIERUNG DES ANLAGEVERMÖGENS.	98
ABBILDUNG 6-5:	BEWIRTSCHAFTUNGSÄRÄUME EINER TALSPERRE NACH DIN 19700 (2004) TEIL 11.	100
ABBILDUNG 6-6:	RISIKOKARTE OSTERODE AM HARZ. GESCHÄDIGTE OBJEKTE SIND MIT RAUTEN GEKENNZEICHNET, DEREN FARBE EIN MAß FÜR DAS RISIKO IST. ANGABEN UNTER VERNACHLÄSSIGUNG DER HOCHWASSERSCHUTZWIRKUNG DER TALSPERRE.	103
ABBILDUNG 7-1:	DAS EINZUGSGEBIET DER ALLER MIT DEN BEARBEITUNGSGEBIETEN NACH DER WASSERRAHMENRICHTLINIE. SCHRAFFIERT SIND DIE TEILGEBIETE DES SÜDALLERMODELLS DARGESTELLT, DER UMRISSE DES WESTHARZMODELLS IST EBENFALLS GEZEIGT.	107
ABBILDUNG 7-2:	EINE MIT DEM ALGORITHMUS NACH MARTZ UND GARBRECHT (1993) AUTOMATISCH GENERIERTE TEILFLÄCHE MIT IHREN UNTERGEBIETEN UND DIE ENTSPRECHENDE TEILFLÄCHE DER HYDROGRAFISCHEN KARTE.	108
ABBILDUNG 7-3:	HALBAUTOMATISCHE TEILFLÄCHENGENERIERUNG: OBEN LINKS: TEILFLÄCHE DER HYDROGRAFISCHEN KARTE MIT AUTOMATISCH GENERIERTEN TEILFLÄCHENDATENSÄTZEN. OBEN RECHTS: DER AM BESTEN ZUM VERFEINERTEN GEWÄSSERNETZ PASSENDE DATENSATZ. UNTEN: DIE VERFEINERTEN TEILFLÄCHEN.	110
ABBILDUNG 7-4:	„ARCGIS-MODEL“ ZUR HALBAUTOMATISCHEN ANPASSUNG VON TEILFLÄCHENDATENSÄTZEN AN DIE HYDROGRAFISCHE KARTE.	111
ABBILDUNG 7-5:	HÖHENMODELL SRTM25, ÜBERLAGERT MIT HYDROGRAFISCHER KARTE UND ÜBERARBEITETEM GEWÄSSERNETZ (LINKS) UND VERFEINERUNG DES SÜDALLERMODELLS (RECHTS) AM BEISPIEL DES EINZUGSGEBIETS DER RHUME.	112
ABBILDUNG 7-6:	TEILFLÄCHEN (WEIßE UMRANDUNG) IM BEREICH DER NORDGRUPPE DER HARZTALSPERREN AUF DEM AGGREGIERTEN DIGITALEN LANDNUTZUNGSMODELL ATKIS.	114
ABBILDUNG 7-7:	MODELLSTRUKTUR DES WESTHARZMODELLS ALS BAUMDARSTELLUNG DER SYSTEMELEMENTE.....	116
ABBILDUNG 7-8:	DIE VERZWEIGUNG DES OKER-GRANE-STOLLENS, SYSTEMELEMENT NR. 751 UND IHRE EIGENSCHAFTEN: DIE VOM ZUFLUSS ABHÄNGIGE AUFTeilUNG DES ABFLUSSES ZUM PEGEL OKERTAL (482112) UND ZUM OKER-GRANE-STOLLEN (100040).	117
ABBILDUNG 7-9:	KENNLINIEN FÜR DEN SPEICHER GRUMBACH_A01, DER DIE TEICHKASKADE DES GRUMBACHS ZUSAMMENFASST.	117
ABBILDUNG 7-10:	TEICHKASKADEN DES OBERHARZER WASSERREGALS IM OBERLAUF DER INNERSTE UND IHRE ZUSAMMENFASSUNG ZU GRÖßEREN SPEICHERN, IN DER ABBILDUNG ALS DREIECKE DARGESTELLT.....	118
ABBILDUNG 7-11:	SYSTEMELEMENTE EINER TALSPERRE AM BEISPIEL DER SÖSETALSPERRE.	119
ABBILDUNG 7-12:	OBEN: LANGJÄHRIGE MITTELWERTE DES NIEDERSCHLAGS FÜR DEN ZEITRAUM 1951-2009, ERSTELLT MIT DEN RASTERDATEN AUS HABERLANDT ET AL. (2010). UNTEN: VERGLEICH DER ISOHYETEN DES ZEITRAUMS 1951-2009 UND DES FÜR DIE KALIBRIERUNG VERWENDETEN ZEITRAUMS 1971–2000.	122
ABBILDUNG 7-13:	LANGJÄHRIGE MONATSWERTE DES ABFLUSSES AN DEN ZULAUFPEGELN DER TALSPERREN (GOCHT UND MEON, 2012, VERÄNDERT).	123
ABBILDUNG 7-14:	TALSPERRENNINHALTE AM MONATSERSTEN IM VERGLEICH MIT DER BEOBACHTUNG FÜR DIE ZEITREIHE 1971-2000. DIE HEUTE VERWENDETEN BETRIEBSREGELN WURDEN 1989 ZULETZT ÜBERARBEITET (GRAUE LINIE IN DER ABBILDUNG).	124
ABBILDUNG 7-15:	DAUERLINIEN DER TALSPERRENNINHALTE AM MONATSERSTEN.	125
ABBILDUNG 7-16:	BEOBACHTETE UND BERECHNETE JAHRESSUMMEN DER ÜBERLEITUNGEN RADAU-STOLLEN, OKER-GRANE-STOLLEN UND GÖSE-BEILEITUNG.	126
ABBILDUNG 7-17:	DAUERLINIEN DER JÄHRLICHEN ÜBERLEITUNGEN IM VERBUND DER NORDGRUPPE.	127

ABBILDUNG 7-18:	MONATLICHE BEOBACHTETE UND BERECHNETE TRINKWASSERPRODUKTION IN DEN DREI WASSERWERKEN DES TALSPERRENBETREIBERS.....	128
ABBILDUNG 7-19:	„KNOTEN OKERTAL“, DIE FÜR EINE KALIBRIERUNG ANSPRUCHSVOLLSTE STELLE DES WESTHARZMODELLS.	129
ABBILDUNG 7-20:	ABFLÜSSE AN DEN PEGELN UNTERHALB DER TALSPERREN IM VERGLEICH MIT BEOBACHTUNGSWERTEN FÜR DIE ZEITREIHE 1971-2000 AUF TAGESBASIS.	130
ABBILDUNG 7-21:	TAGESMITTELWERTE DES JAHRESHÖCHSTABFLUSSES AUS DER KALIBRIERUNG AUF STUNDENBASIS. BEOBACHTUNG UND BERECHNUNG FÜR DIE ZEITREIHE 2002–2008 AN DEN TALSPERRENZUFLÜSSEN.....	131
ABBILDUNG 7-22:	DAUERLINIEN DER TALSPERRENNINHALTE AUS DER KALIBRIERUNG MIT STUNDENWERTEN.	132
ABBILDUNG 7-23:	BEOBACHTETE UND BERECHNETE TALSPERRENNINHALTE AUF STUNDENBASIS, BEOBACHTETE WERTE ALS SPEICHERINHALT AM MONATSENDE.	133
ABBILDUNG 7-24:	VERGLEICH DER BEOBACHTETEN UND BERECHNETEN STAUHÖHEN AN DER INNERSTETALSPERRE FÜR DIE ZEITREIHE 2002–2008. BEOBACHTETE WERTE ALS STUNDENWERTE.....	134
ABBILDUNG 7-25:	VERGLEICH DER BEOBACHTETEN UND BERECHNETEN STAUHÖHEN AN DER OKERTALSPERRE FÜR DIE ZEITREIHE 2002–2008. BEOBACHTETE WERTE ALS STUNDENWERTE.....	135
ABBILDUNG 7-26:	VERGLEICH DER BEOBACHTETEN UND BERECHNETEN STAUHÖHEN AN DER SÖSETALSPERRE FÜR DIE ZEITREIHE 2002–2008. BEOBACHTETE WERTE ALS STUNDENWERTE.....	135
ABBILDUNG 7-27:	BERECHNETE ABGABEN FÜR INNERSTE-, OKER- UND SÖSETALSPERRE FÜR DIE ZEITREIHE 2002–2008.....	136
ABBILDUNG 7-28:	ABFLÜSSE AN DEN PEGELN UNTERHALB DER TALSPERREN AUS DER SIMULATION MIT STUNDENWERTEN.	137
ABBILDUNG 7-29:	VERGLEICH DER BERECHNETEN UND BEOBACHTETEN MONATLICHEN TRINKWASSERPRODUKTION FÜR DIE ZEITREIHE 2002-2008.	138
ABBILDUNG 7-30:	BERECHNETE ENERGIEERZEUGUNG NACH TALSPERREN FÜR DIE TURBINEN DES TALSPERRENBETREIBERS.....	139
ABBILDUNG 7-31:	VERGLEICH DER BERECHNETEN JÄHRLICHEN PRODUKTION FÜR DIE JAHRESREIHE 2002–2008, SUMMEN DER GESAMTEN ZEITREIHE (MEON UND GOCHT, 2012, VERÄNDERT).	140
ABBILDUNG 7-32:	VERGLEICH DER BERECHNETEN UND BEOBACHTETEN ENERGIEPRODUKTION AN DEN TALSPERREN.....	141
ABBILDUNG 8-1:	LANGJÄHRIGE MITTELWERTE DER NIEDERSCHLÄGE DER REALISATIONEN 1 BIS 10 AUS WETTREG 2006 FÜR DIE ZEITREIHE 1971-2000 IM VERGLEICH MIT DER INTERPOLATION VON HABERLANDT ET AL. (2010).	145
ABBILDUNG 8-2:	DAUERLINIEN DER TALSPERRENNINHALTE FÜR DIE ZEITREIHE 1971-2000 FÜR 20 REALISATIONEN VON WETTREG 2006 SOWIE BEOBACHTUNG UND SIMULATION.....	146
ABBILDUNG 8-3:	WETTREG 2006: LANGFRISTIGE ENTWICKLUNG AN DEN ZULAUFPEGELN DES UNTERSUCHUNGSGEBIETS IN QUARTALSMITTELWERTEN.	147
ABBILDUNG 8-4:	WETTREG 2006: LANGFRISTIGE ENTWICKLUNG AN DEN ABLAUFPEGELN DES UNTERSUCHUNGSGEBIETS IN QUARTALSMITTELWERTEN.	148
ABBILDUNG 8-5:	ENTWICKLUNG DES HQ_{100} AN DEN ZULAUFPEGELN DES TALSPERRENSYSTEMS AUF DER BASIS VON WETTREG 2006.	149
ABBILDUNG 8-6:	LANGJÄHRIGE MITTELWERTE DER NIEDERSCHLÄGE AUS REMO UBA FÜR DIE ZEITREIHE 1971-2000 IM VERGLEICH MIT DER INTERPOLATION VON HABERLANDT ET AL. (2010).....	150
ABBILDUNG 8-7:	LANGJÄHRIGE MITTELWERTE DER NIEDERSCHLÄGE AUS REMO BFG FÜR DIE ZEITREIHE 1971-2000 IM VERGLEICH MIT DER INTERPOLATION VON HABERLANDT ET AL. (2010).....	151
ABBILDUNG 8-8:	VERGLEICH DER DAUERLINIEN DER TALSPERRENNINHALTE, BERECHNET MIT REMO UBA UND REMO BFG FÜR DIE VERGANGENHEIT.....	152
ABBILDUNG 8-9:	REMO UBA UND BFG: LANGFRISTIGE ENTWICKLUNG AN DEN ZULAUFPEGELN DES UNTERSUCHUNGSGEBIETS IN QUARTALSMITTELWERTEN.....	155
ABBILDUNG 8-10:	ENTWICKLUNG DES HQ_{100} AN DEN ZULAUFPEGELN DES TALSPERRENSYSTEMS FÜR REMO UBA UND REMO BFG.	157
ABBILDUNG 9-1:	ANSATZ ZUR OPTIMIERUNG DES TALSPERRENBETRIEBS BEZÜGLICH HOCHWASSERSCHUTZ.....	160

ABBILDUNG 9-2:	MIT DEM METAMODELL BERECHNETE INHALTE DER SÖSETALSPERRE IM VERGLEICH MIT DER BERECHNUNG AUS PANTA RHEI.	161
ABBILDUNG 9-3:	MIT DEM METAMODELL BERECHNETE ABGABEN DER SÖSETALSPERRE IM VERGLEICH MIT DER BERECHNUNG AUS PANTA RHEI.	161
ABBILDUNG 9-4:	MIT DEM METAMODELL BERECHNETE INHALTE DER SÖSETALSPERRE FÜR DIE FERNE ZUKUNFT 2071–2100 IM VERGLEICH MIT DER BERECHNUNG AUS PANTA RHEI.	162
ABBILDUNG 9-5:	MIT DEM METAMODELL BERECHNETE ABGABEN DER SÖSETALSPERRE FÜR DIE FERNE ZUKUNFT 2071–2100 IM VERGLEICH MIT DER BERECHNUNG AUS PANTA RHEI.	162
ABBILDUNG 9-6:	OPTIMIERTE ABGABEN DER SÖSETALSPERRE FÜR DIE FERNE ZUKUNFT IM VERGLEICH MIT DER AUSGANGSSITUATION.	164
ABBILDUNG 9-7:	AUSWIRKUNG DER OPTIMierten ABGABEN DER SÖSETALSPERRE AUF DEN SPEICHERINHALT FÜR DIE FERNE ZUKUNFT IM VERGLEICH MIT DER AUSGANGSSITUATION.	164
ABBILDUNG 9-8:	ERHÖHUNG DER ABGABE IN DEN WINTERMONATEN. ROT: ERGEBNIS DES METAMODELLS, BLAU: REDUZIerte ERHÖHUNG DURCH EVALUATION DES OPTIMIERUNGSERGEBNISSES IN PANTA RHEI	166
ABBILDUNG 9-9:	REMO UBA 2071-2100. MAXIMALSCHEITEL AN DEN ABLAUFPEGELN DER OPTIMierten TALSPERREN FÜR DIE FERNE ZUKUNFT, BASIEREND AUF DEN BETRIEBSREGELN VON 1989 (BLAU) UND DEN OPTIMierten BETRIEBSREGELN (ORANGE).	167
ABBILDUNG 9-10:	REMO UBA 2071-2100. SPEICHERINHALTE DER OPTIMierten TALSPERREN FÜR DIE FERNE ZUKUNFT, BASIEREND AUF DEN BETRIEBSREGELN VON 1989 (BLAU) UND DEN OPTIMierten BETRIEBSREGELN (ORANGE).	167
ABBILDUNG 9-11:	REMO BFG. MAXIMALSCHEITEL AN DEN ABLAUFPEGELN DER OPTIMierten TALSPERREN FÜR DIE FERNE ZUKUNFT, BASIEREND AUF DEN BETRIEBSREGELN VON 1989 (BLAU) UND DEN OPTIMierten BETRIEBSREGELN (WEINROT). .	168
ABBILDUNG 9-12:	REMO BFG. SPEICHERINHALTE DER OPTIMierten TALSPERREN FÜR DIE FERNE ZUKUNFT, BASIEREND AUF DEN BETRIEBSREGELN VON 1989 (BLAU) UND DEN OPTIMierten BETRIEBSREGELN (WEINROT).	168
ABBILDUNG 10-1:	REMO UBA. STÜNDLICHE JAHRESEXTREMWERTE DER TALSPERRENABGABE FÜR DIE VERGANGENHEIT (20C, 1971-2000), DIE FERNE ZUKUNFT (2071-2100) MIT DEN BETRIEBSREGELN VON 1989 (A1B) UND DEN OPTIMierten BETRIEBSREGELN (A1B OPTIMiert).....	172
ABBILDUNG 10-2:	DIE ORTSLAGE OSTERODE UNTERHALBE DER SÖSE-TALSPERRE. EIGENE DARSTELLUNG UNTER VERWENDUNG VON SATELLITENBILDERN AUS GOOGLE MAPS.	176
ABBILDUNG 10-3:	ABSOLUTE (OBEN) UND RELATIVE (UNTEN) WERTE FÜR DIE MONETÄRE ÄNDERUNG VON NUTZUNGEN DER SÖSETALSPERRE FÜR DIE VERGANGENHEIT UND DIE PROJEKTION DES REMO-UBA-LAUFs FÜR DIE FERNE ZUKUNFT 2071–2100 UND UNTERSCHIEDLICHE BEVÖLKERUNGSPROGNOSEN.....	176

Tabellenverzeichnis

TABELLE 2-1:	FRÜHE TALSPERRENBAUTEN IM DEUTSCHEN REICH.....	20
TABELLE 2-2:	TALSPERRENPLANUNGEN IM WESTHARZ (A) UND OSTARZ (B), STAND 1911 (GFWH, 1911).	22
TABELLE 2-3:	KENNWERTE DER TALSPERREN IM WESTHARZ. ERLÄUTERUNGEN DER ANGABEN ZUR EINZUGSGEBIETSGRÖÖE IM TEXT.	25
TABELLE 2-4:	ENERGIEERZEUGUNG AN DEN TALSPERREN UND IM LEITUNGSNETZ DER HARZWASSERWERKE GMBH (HWW, 2008, VERÄNDERT).	33
TABELLE 3-1:	ÄNDERUNG DER TEMPERATUR IN °C IN DER NAHEN ZUKUNFT 2021-2050 (OBEN) UND DER FERNEN ZUKUNFT 2071–2100 (UNTEN) IM VERGLEICH ZUR PERIODE 1961-1990 (UBA 2008, VERÄNDERT).	51
TABELLE 3-2:	RELATIVE ÄNDERUNG [%] DES NIEDERSCHLAGES DER PERIODE 2021-2050 (OBEN) UND DER PERIODE 2071– 2100 IM VERGLEICH ZUR PERIODE 1961–1990 (UBA 2008 VERÄNDERT).	52
TABELLE 4-1:	KOMPONENTEN DER KONZEPTIONELLEN ANSATZKONFIGURATION OHNE AKTUELLE ERWEITERUNGEN DER PROZESSBESCHREIBUNGEN FÜR DIE KLIMAFOLGENFORSCHUNG.....	71
TABELLE 6-1:	AKTIVITÄTEN UND IHRE ZUSAMMENFASSUNGEN IN DEN UNTERSCHIEDLICHEN EINGANGSDATEN DER EXPOSITIONSANALYSE.....	94
TABELLE 6-2:	KAPITALINTENSITÄTEN IN EURO FÜR AUSRÜSTUNGEN UND BAUTEN IM KREIS OSTERODE FÜR DIE JAHRE 2005 BIS 2009. AKTIVITÄTEN, DIE IM DURCH HOCHWASSER GEFÄHRDETEN BEREICH ANGETROFFEN WURDEN.	99
TABELLE 6-3:	WERTSCHÖPFUNG PRO KOPF UND TAG IN EURO IM KREIS OSTERODE FÜR DIE JAHRE 2005 BIS 2009. 230 VOLLE BETRIEBSTAGE PRO JAHR. AKTIVITÄTEN, DIE IM DURCH HOCHWASSER GEFÄHRDETEN BEREICH ANGETROFFEN WURDEN.	99
TABELLE 6-4:	EINGANGSDATEN FÜR DIE SCHÄTZUNG VON ÜBERFLUTUNGSFLÄCHEN EXTREMER ÜBERSCHREITUNGSWAHRSCHEINLICHKEIT FÜR DEN PEGEL MARIENTAL, OSTERODE AM HARZ.....	101
TABELLE 6-5:	RISIKEN IN €/A FÜR GEBÄUDE, AUSRÜSTUNGEN UND BETRIEBSUNTERBRECHUNG IN OSTERODE AM HARZ.	103
TABELLE 7-1:	PARAMETER ZUR GENERIERUNG SECHS UNTERSCHIEDLICHER TEILFLÄCHENDATENSÄTZE.	109
TABELLE 7-2:	VERWENDUNG DER MIT TOPAZ GENERIERTEN TEILFLÄCHENDATENSÄTZE IM EINZUGSGEBIET DER RHUME.	112
TABELLE 7-3:	TEILFLÄCHEN DER HYDROGRAFISCHEN KARTE, DES KLBIW- UND DES SÜDALLERMODELLS.	113
TABELLE 7-4:	AGGREGIERTE LANDNUTZUNGEN FÜR DIE ERSTELLUNG VON HYDROTOPEN.	114
TABELLE 7-5:	AGGREGIERTE BODENARTEN NACH ANTEILEN DER HAUPTBODENARTEN FÜR DIE ERSTELLUNG VON HYDROTOPEN....	115
TABELLE 7-6:	GÜTEMAÖE FÜR DIE VALIDIERUNG DES MODELLS AUF TAGESBASIS FÜR DEN ZEITRAUM 2001–2009 IM VERGLEICH MIT DER KALIBRIERUNG.	142
TABELLE 8-1:	VERGLEICH VON TRINKWASSER- UND ENERGIEPRODUKTION DER HARZWASSERWERKE FÜR DIE KALIBRIERUNG UND DIE WIEDERGABE DER VERGANGENHEIT IN REMO UBA UND REMO BFG.	153
TABELLE 8-2:	EXTREMWERTE DES ABFLUSSES AM PEGEL RIEFENSBECK, ERMITTLUNG AUF DER GRUNDLAGE VON BEOBACHTUNGSDATEN, REMO UBA UND REMO BFG (LN3, MLM).	154
TABELLE 9-1:	EINGANGSWERTE FÜR DIE OPTIMIERUNG UND ERGEBNISSE DES METAMODELLS.....	165
TABELLE 9-2:	EVALUIERUNG DER OPTIMIERUNGSERGEBNISSE AUS DEM METAMODELL IN PANTA RHEI FÜR DAS FERNE ZUKUNFTSSZENARIO.....	166
TABELLE 10-1:	EXTREME ABFLÜÖSE AM PEGEL MARIENTAL UNTER DER SÖSETALSPERRE FÜR REMO UBA UND REMO BFG (GUMBEL-VERTEILUNG, MOMENTENMETHODE).	172
TABELLE 10-2:	DIREKTES UND INDIREKTES HOCHWASSERRISIKO IN €/A FÜR OSTERODE IM HARZ UND DIE MIT DEM REMO UBA- LAUF UNTERSUCHTEN VARIANTEN FÜR UNTERSCHIEDLICHE BEVÖLKERUNGSPROGNOSEN.	173
TABELLE 10-3:	TRINKWASSER- UND ENERGIEPRODUKTION FÜR DIE UNTERSUCHTEN VARIANTEN FÜR REMO UBA (OBEN) UND REMO BFG (UNTEN).	174
TABELLE 10-4:	NUTZEN-KOSTEN-RELATION IN ABHÄNGIGKEIT DER BEVÖLKERUNGSPROGNOSE	178

Zusammenfassung

Die Klimaforschung erwartet einen deutlichen Anstieg der globalen mittleren Temperatur bis zum Ende des Jahrhunderts. Belastbare Aussagen über die Auswirkungen des Klimawandels auf den regionalen Wasserhaushalt werden durch den Antrieb von hoch aufgelösten Wasserhaushaltsmodellen mit regionalen Klimamodellen erwartet. Die im Vergleich zu globalen Klimamodellen hohe Auflösung der Regionalmodelle soll eine realistische Abbildung des Wasserhaushalts der Vergangenheit in Wasserhaushaltsmodellen ermöglichen. Gelingt das, können die Zukunftsprojektionen der Regionalmodelle für die Modellierung des zukünftigen Wasserhaushalts verwendet werden. Diese Zielstellung verfolgte das niedersächsische Forschungsprojekt KLIFWA am Beispiel des Einzugsgebiets der Aller. Große Teile ihres Abflusses erhält sie über die Nebenflüsse Leine und Oker, die den Harz westlich der Elbe-Weser-Wasserscheide entwässern. Der Wasserreichtum dieses nördlichsten deutschen Mittelgebirges wird seit Beginn des zweiten Drittels des 20. Jahrhunderts mit Talsperren bewirtschaftet. Das Hauptziel dieser Arbeit war, den Einfluss einer Änderung der klimatischen Rahmenbedingungen auf den Betrieb des heute aus sechs Speichern bestehenden Talsperrenverbundsystems im Westharz abzuschätzen. Darauf aufbauend waren Möglichkeiten der Betriebsanpassung mit besonderem Augenmerk auf die veränderte Hochwasserbelastung und unter Berücksichtigung der Multifunktionalität der Talsperren zu ermitteln und zu bewerten.

Die Simulation des Talsperrenbetriebs auf Monatsbasis mit Speicherbewirtschaftungsmodellen ist Stand der Technik. Hierfür sind lange Zeitreihen der Belastung aus hydrologischen Modellen erforderlich. Die Prognosesicherheit von Speicherbewirtschaftungsmodellen ist gering, wenn der Talsperrenbetrieb die hydrologischen Prozesse unterhalb der Talsperren beeinflusst. Dies ist für das Untersuchungsgebiet gegeben, dessen Wasserhaushalt durch ein komplexes Talsperrenverbundsystem überprägt ist. Eine belastbare Modellierung kann hier nur in Form einer integrierten, zeitlich und räumlich hoch aufgelösten Langzeitkontinuumsimulation erfolgen. Ein Großteil der vorliegenden Arbeit befasst sich daher mit der integrierten Simulation des Verbundbetriebs mit dem Wasserhaushaltsmodell PANTA RHEI im Tages- und Stundenzeitschritt.

Hierzu wurde ein hydrologisches Modell des Untersuchungsgebiets aufgebaut und für einen historischen Zeitraum von 30 Jahren an Beobachtungsdaten in Tagesauflösung kalibriert. Daran schloss sich die Modellierung von Szenarien der Vergangenheit und Zukunft unter Nutzung von meteorologischen Datenfeldern aus dem statistischen regionalen Klimamodell WETTREG an. Da ein besonderes Augenmerk der Arbeit auf dem Hochwassermanagement lag und die Hochwassercharakteristik des Untersuchungsgebiets nur in Stundenauflösung treffend wiedergegeben werden kann, wurde ein weiteres Exemplar des Modells an stündlichen Beobachtungswerten der Zeitreihe 2002–2008 kalibriert. Dieses Modell diente der Modellierung von Szenarien der Vergangenheit und Zukunft mit dem dynamischen regionalen Klimamodell REMO, das im Gegensatz zu WETTREG stündliche Daten liefert. Tages- und Stundenzeitschrittmodell dienten der gegenseitigen Plausibilisierung der mit den Klimamodelldaten berechneten Ergebnisse.

Die Modellierung der Vergangenheit mit Beobachtungsdaten gelang sehr gut. Zuflüsse, Talsperreninhalte, Trinkwasserentnahmen und Energieproduktion konnten im langjährigen Mittel gut bis sehr gut wiedergegeben werden.

Die Modellierung mit Klimamodelldaten gelang für diejenigen Talsperren, deren Einzugsgebiet vom Brocken unbeeinflusst ist. Die in Brocken und Bruchberg gegliederte Orografie des Hochharzes erscheint in den regionalen Klimamodellen wegen ihrer groben Auflösung als nur eine Erhebung, deren Gipfel südwestlich des Bruchbergs aufragt. In dessen Luv erzeugen die Klimamodelle hohe Niederschläge. Das führt dazu, dass der Brocken als eigentlich höchste Erhebung des Harzes in den Windschatten gerät und daher in den Klimamodellen geringere Niederschläge als in der Realität erhält. Talsperren, deren Einzugsgebiete vom Brocken beeinflusst sind, konnten daher nicht zufriedenstellend mit Daten aus Klimamodellen abgebildet werden.

Eine zukünftige Verschiebung hin zu nasseren Wintern und trockeneren Sommern ist das Ergebnis der Modellierung. Die Talsperren des Westharzes werden daher in Zukunft stärker für einen Ausgleich zwischen sehr nassen und sehr trockenen Perioden sorgen müssen. Das wird Auswirkungen auf ihr aus Niedrigwasseraufhöhung, Energieerzeugung, Trinkwassergewinnung und Hochwasserschutz bestehendes Nutzungsspektrum haben. Dem Hochwasserschutz kommt dabei eine Schlüsselrolle zu, da der im Winter zusätzlich vorgehaltene Hochwasserschutzraum das für die trockeneren Perioden des Jahres speicherbare Wasservolumen limitiert. Als eines von vielen möglichen Zielen wurde für die Betriebsanpassung eine konstante Hochwassergefährdung der Unterlieger gewählt: bei vergrößerter Hochwasserbelastung der Talsperren sollten ihre höchsten Abgaben in Zukunft nicht größer sein als in der Vergangenheit. Es konnte gezeigt werden, dass eine Anpassung des Betriebs mit dem vorhandenen System technisch machbar ist.

Durch die Abschätzung der Auswirkungen der Betriebsanpassung auf die anderen Nutzungen wurde untersucht, in welchem Ausmaß die Anpassung tatsächlich wünschenswert ist. Diesem Vergleich diente eine Überführung der Nutzungen in monetäre Einheiten. Den größten Aufwand erforderte die Quantifizierung des Hochwasserrisikos, dessen Änderung von Klima- und demografischem Wandel und der Betriebsanpassung abhängig ist. Das Hochwasserrisiko konnte exemplarisch für die Ortslage Osterode unterhalb der Sösetalsperre ermittelt werden: Ein vom Autor entwickeltes Verfahren zur Wertermittlung ermöglichte die Schätzung der Exposition anhand der Anzahl von Beschäftigten und Anwohnern. Der Einfluss des demografischen Wandels auf das Hochwasserrisiko war so abschätzbar.

Für drei Talsperren des Verbundes zeigt die Arbeit eine Erhöhung der Energie- und Trinkwasserproduktion durch das zukünftig größere Wasserdargebot im Winter. Dieser Zugewinn geht allerdings durch eine Anpassung des Hochwasserschutzes teilweise verloren.

Ein Nutzen-Kosten-Vergleich war für die Sösetalsperre und die darunter befindliche Ortslage Osterode für eine Projektion der fernen Zukunft 2071–2100 möglich. Die Kosten der Betriebsanpassung in Form von entgangener Wertschöpfung wurde dem Nutzen in Form von verhinderten Hochwasserschäden gegenübergestellt. Eine auf eine konstante Gefährdung abzielende Verminderung der zukünftigen Spitzenabgaben der Sösetalsperre auf das heutige Niveau führt zu einer Nutzen-Kosten-Relation im Bereich zwischen zwei und drei. Diese Strategie ist also wirtschaftlich.

Eine erweiterte Betrachtung stellt der Risikominderung durch die Betriebsanpassung den vom demografischen Wandel verursachten Rückgang des Risikos gegenüber. Während bei der Betrachtung der Gefährdung allein eine Konstanz des Hochwasserschutzes gegeben scheint, tritt bei der Betrachtung des Risikos eine deutliche Verbesserung des Schutzes hervor. Dies überrascht, ist aber durch den Bevölkerungsrückgang im ländlichen Raum zu erklären. Im Rahmen eines modernen Hochwasserrisikomanagements könnte daher auch eine Erhöhung der Gefährdung (d.h. der Abgaben) diskutiert werden, wenn Hochwasserschutz im Vergleich von Vergangenheit und Zukunft nicht als konstante Gefährdung, sondern als konstantes Risiko definiert wird. Die Verringerung der Spitzenabgaben ist nämlich mit Kosten verbunden; und die Nutzen-Kosten-Relation sinkt mit den geschützten Werten.

Da nur ein Klimamodelllauf die für die Fragestellung nötige Eignung aufwies, konnte die Unsicherheit der Klimamodelle nicht quantifiziert werden. Die genannten Zahlen müssen daher als Nachweis der prinzipiellen Möglichkeit der Ermittlung gesehen werden, nicht als belastbare Werte für wasserwirtschaftliche Planungen. Deren Ermittlung bleibt kommenden Generationen von regionalen Klimamodellen vorbehalten. Das erforderliche Ausmaß einer zukünftigen Anpassung an den Hochwasserschutz kann nur durch einen Interessenausgleich zwischen den beteiligten Gruppen wie Talsperrenaufsicht, Talsperrenbetreiber und interessierte Öffentlichkeit bestimmt werden. Die in der vorliegenden Arbeit entwickelte Methodik ist für die Unterstützung dieses Ausgleichsprozesses gut geeignet.

Das erstellte Modell legt wesentliche Grundlagen für ein Echtzeitbetriebssystem für den Talsperrenbetrieb, sodass ein Transfer von Ergebnissen angewandter Forschung in die Praxis möglich ist. Die hier vorgelegte zeitlich und räumlich hoch aufgelöste integrierte Langzeitkontinuumsimulation eines Verbundspeichersystems mit Anpassung des Hochwasserschutzes an Klimaänderung und monetärer Bewertung der Auswirkungen auf andere Nutzungen ist - trotz intensiver Recherche - in der dem Autor bekannten Literatur ohne Beispiel und die wesentliche innovative Leistung dieser Arbeit.

Summary

Currently climate researchers expect a significant increase of mean global temperature until the end of the century. Forcing high resolution water balance models with regional climate models shall deliver reliable results about climate change impact on the regional water balance. The high resolution, as compared to global models, shall enable a realistic reproduction of the past in water balance models. If this target is achieved, projections from regional climate models can be used to model the future water balance. The Lower Saxony KLIFWA project pursues this approach on the example of the Aller basin. Leine and Oker contribute large shares to her runoff, draining the Harz ridges west of the Elbe-Weser drainage divide. Since the second third of the 20th century, reservoirs manage the abundance of water in the northernmost German low mountain range. The main objective of this work was to estimate the impact of climate change on the operation of the multireservoir system in the western Harz ridges, consisting of six reservoirs today. Furthermore management options with special respect to flood protection were investigated while taking the multiple uses of the system into account.

Simulation of reservoir operation on monthly basis by means of reservoir management models is the current state of the art. Long time series of loading from hydrological models are the necessary input for this purpose. Prognostic reliability of reservoir management models is low when reservoir operation impacts downstream hydrologic processes. This is the case in the study area where a complex multi-reservoir system interacts with the water balance of the basins. Here, reliable modelling requires integrated long-term continuum simulation on a high resolution in time and space. A large part of the work addresses the integrated simulation of multireservoir operation in the water balance model PANTA RHEI on daily and hourly basis.

For this purpose a hydrologic model of the study area was set up and calibrated using daily observations for a 30 years historic time series. Modelling of the past and future climate scenarios by means of daily meteorological fields from the statistical regional model WETTREG was the second step. Since special emphasis was placed on flood management in this work and flood characteristics in small basins need hourly resolution for accurate reproduction, a second model was calibrated using hourly observations of the 2002-2008 time series. This model was used for the calculation of past and future climate scenarios of the dynamic regional climate model REMO, which delivers hourly data. The models on daily and hourly basis were used for mutual verification of results produced with climate model input.

Modelling of the past based on observations succeeded with very good results. Inflow, reservoir storage, drinking water abstraction and power generation were met good to excellent on a long term annual average.

Modelling with input from climate models was successful for those reservoirs whose basins are not affected by the Brocken, the highest mountain of the Harz. Due to low spatial resolution of the climate models, the orology of the high Harz, composed of the Brocken and the Bruchberg, is represented as just one elevation with its peak in the south-west of the

Bruchberg. In its luv, the climate models generate high precipitation. This leads to a position of the Brocken in the lee, receiving lower precipitation in the climate models than in reality. Reservoirs with basins strongly influenced by the Brocken could not be modelled satisfactorily with regional climate model input therefore.

A future shift to wetter winters and dryer summers is the modelling result. The reservoirs in the western Harz will be needed much more for balancing wet and dry periods in future. This will impact their multiple uses, low flow enhancement, power generation, water supply and flood protection. The latter plays a pivotal role, because additional flood storage requirements in winter limit the water volume storable for dryer periods of the year. From the many possible objectives, a constant flood hazard for downstream riparian residents was selected for operation adaptation: Increased flood loading of the reservoirs shall not lead to higher peak releases in the future than in the past. The work presents the technical feasibility of this objective.

An assessment of the impacts, the operation adaptation has on the other uses, reveals to which degree operation adaptation is actually desirable. A conversion into monetary units enabled this comparison. Largest effort was invested into a quantification of flood risk, whose changes are dependent on climate and demographic change and operation adaptation. Flood risk was exemplarily estimated for the city of Osterode downstream the Söse reservoir: The author developed a methodology for the valuation of assets, enabling exposure appraisal on the basis of the number of persons employed and inhabitants. In this way, the impact of demographic change on flood risk could be assessed.

For three reservoirs of the system the study shows an increase in power generation and water supply as a result of increased water availability in future winters. Adaptation of flood protection leads to partial losses of these gains.

A benefit-cost comparison was possible for the Söse reservoir and the downstream city of Osterode for a projection of the distant future 2071-2100. Costs from flood protection in the form of lost value added were opposed to benefits from avoided flood damage. A reduction of future peak releases to current levels for the Söse dam, aiming at a constant hazard, leads to a benefit-cost ratio between two and three. This strategy is economically viable therefore.

An extended evaluation opposes risk mitigation due to operation adaptation and risk decrease due to demographic change. Appraisal of risk demonstrates a significant improvement of flood protection where an assessment of the hazard alone indicates a constant level. This apparent contradiction can be explained by decreasing population in rural areas. In the framework of modern flood risk management an increase of hazard (viz. peak releases) can be discussed, if flood protection is defined as a constant risk instead of a constant hazard in the comparison of past and future. The reduction of peak releases is associated with a cost, and the benefit-cost ratio decreases with the protected assets.

Since only one climate model realisation was appropriate for the task, the uncertainty from climate models could not be assessed. The figures presented should be seen as evidence that the proposed methodology delivers comprehensible results therefore. They should not be interpreted as reliable figures for water resources planning. Assessment of such figures remains for coming generations of regional climate models. The desirable degree of opera-

tion adaptation can only be determined by balancing the interests of stakeholders, e.g. reservoirs supervisory body, reservoirs operator and the public. The methodology developed in this work is well suited to support this process.

The model presented here lays the fundamental principles for a real time operation system of the multi-reservoir system in the western Harz. This enables a transfer of applied research results into practice. Integrated long-term continuum simulation of a multi-reservoir system including adaptation of flood protection and monetary assessment of its impact on other uses of the system is - after thorough investigation - unprecedented in the literature known to the author and the essential innovation of the work presented here.

1 Einführung

1.1 Problemstellung

Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit war es, den Einfluss des Klimawandels auf den Betrieb des aus sechs Speichern bestehenden Talsperrenverbundsystems im Westharz abzuschätzen. Auf dieser Grundlage waren in einem Optimierungsprozess Möglichkeiten der Anpassung des Betriebs an eine veränderte Hochwasserbelastung zu untersuchen. Die Multifunktionalität der Talsperren sollte berücksichtigt und Auswirkungen auf dieselbe abgeschätzt werden.

Den Rahmen für die vorliegende Arbeit bildete das Forschungsprojekt KLIFWA, „Auswirkungen von Klimaänderungen auf Wasserdargebot, Hochwasserrisiko und Gewässerbelastung in Niedersachsen“. KLIFWA war als Forschungsthema 6 „Wasserhaushalt im Binnenland“ Teil der Forschungsverbund Klimafolgenforschung in Niedersachsen KLIFF (kliff-niedersachsen.de). Zahlreiche inhaltliche Bezüge existieren außerdem zu dem anwendungsorientierten Forschungsverbund KLIBIW, der zeitgleich von denselben Projektpartnern bearbeitet wurde (Meon et al., 2012, Haberlandt et al., 2012).

Im Teilprojekt 3.3 ‚Hochwassermanagement‘ sollten die Talsperren des Westharzes in einem detaillierten Wasserhaushaltsmodell abgebildet werden. Es war Sorge zu tragen, dass das Wasserhaushaltsmodell für die Klimafolgenforschung geeignet ist. Das Modell war anhand langer Abflussreihen zu kalibrieren und bezüglich des Hochwasserschutzes für den Istzustand und die Zukunft mittels Langzeitkontinuen zu untersuchen. Anpassungsstrategien an die Klimaänderung waren zu entwickeln und unter Berücksichtigung der Multifunktionalität der Talsperren einerseits und der Schadenminderung unterhalb der Talsperren andererseits zu bewerten. Schließlich sollten Anforderungen an ein Echtzeitbetriebssystem aus den Ergebnissen abgeleitet werden.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Speicherbewirtschaftung sind global stark unterschiedlich, jedoch in der Tendenz ähnlich: Einer deutlichen Zunahme der Winterzuflüsse mit einer Erhöhung der Hochwasserwahrscheinlichkeit stehen schwache Rückgänge im Sommer gegenüber. Meist gelingt es, durch Modellierung zu zeigen, dass eine Anpassung der Bewirtschaftung diese Änderung mit nur geringen Einbußen der Leistungsfähigkeit auffangen oder zumindest deutlich verringern kann. Dabei hat die Größe des Speichers erwartungsgemäß einen großen Einfluss: Je größer ein Speicher ist, desto geringer fällt die Beeinträchtigung seiner Leistungsfähigkeit aus. Umso größer ist auch sein Potential, Auswirkungen des Klimawandels auszugleichen. Vorliegende Untersuchungen beschränken sich auf eine quantitative Modellierung des Speicherbetriebs unter geänderten Rahmenbedingungen und damit auf eine Bewertung der Anpassungsfähigkeit des technischen Systems.

Gegenwärtig liegt der Fokus der Klimafolgenforschung auf Seiten der Klimamodelle, obwohl davon auszugehen ist, dass eine Änderung der Bewirtschaftung deutlich mehr zur Gesamtunsicherheit beiträgt als die prognostizierte Klimaänderung. Die Nutzung einer größeren Anzahl von Globalmodellen bedingt in der Regel statistisches Downscaling und sehr einfache

konzeptionelle Wasserhaushaltsmodelle. Letztere werden in der Regel im Monats- oder Tageszeitschritt betrieben. Es wird allerdings nicht geprüft, ob diese Wasserhaushaltsmodelle geeignet sind, den Einfluss der Änderung klimatischer Randbedingungen auf den Wasserhaushalt wiederzugeben. Die Modellierung des Speicherbetriebs erfolgt zumeist in einem separaten Speichersimulationsmodell, für die das Wasserhaushaltsmodell die Eingangsdaten liefert.

Die vorliegenden Lösungsansätze geben Anlass zu einer Diskussion der folgenden Punkte:

- Berechnungen auf Monats- oder Tagesbasis liefern nur in großen Einzugsgebieten eine gute Wiedergabe von Hochwasserscheiteln. In kleinen Einzugsgebieten ist dies nur für den Stundenzeitschritt gegeben.
- Statistisches Downscaling setzt voraus, dass zwischen Globalmodellen und Beobachtungen statistische Relationen existieren, die in Vergangenheit und Zukunft gleich sind. Dies ist jedoch bei sich änderndem Klima eigentlich nicht der Fall. Einen Ausweg bilden hier dynamische Klimamodelle, die, angetrieben von einem Globalmodell, die Klimavariablen in höherer Auflösung auf physikalischer Grundlage errechnen.
- Verdunstung und Schnee werden in konzeptionellen Wasserhaushaltsmodellen häufig mit Ansätzen modelliert, die unabhängig von Klimaparametern sind. Klimatisch bedingte Änderungen der Vegetationsperiode oder Schneeschmelze können in ihnen daher nicht berücksichtigt werden.
- Die Abbildung von Wasserhaushalt und Talsperrenbetrieb in getrennten Modellen führt zu Fehlern, wenn der Talsperrenbetrieb die hydrologischen Prozesse unterhalb der Talsperren beeinflusst. Die Wechselwirkungen zwischen Talsperrenbetrieb und Wasserhaushalt sind nur durch eine integrierte Modellierung des Talsperrenbetriebs im Wasserhaushaltsmodell möglich.
- Der beobachtete und prognostizierte Klimawandel wird mit hoher Wahrscheinlichkeit und zu einem großen Anteil auf anthropogene Einflüsse zurückgeführt. Globales Bevölkerungswachstum und technologische Entwicklung gelten hierbei als die wesentlichen Antriebe. Sollen lokale Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel angemessen sein, müssen sie neben der Änderung der Umwelt auch die Änderung der Gesellschaft berücksichtigen.
- Da die Indikatoren gesellschaftlicher und klimatischer Änderung in unterschiedlichen Einheiten gemessen werden, ist eine integrative Bewertung von Anpassungsmaßnahmen nur möglich, wenn diese in ein einheitliches Bewertungssystem überführt werden. Dies geschieht am besten durch eine ökonomische Bewertung, die einen Nutzen-Kosten-Vergleich der Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel ermöglicht.

1.2 Zielsetzung

Aus den vorgenannten Diskussionspunkten werden im Folgenden einige Teilziele abgeleitet. Ihre Erfüllung wird die ökonomische Bewertung einer Anpassung des Talsperrenbetriebs an eine geänderte Hochwasserbelastung ermöglichen:

Neben den Ergebnissen eines statistischen Regionalmodells WETTREG werden auch die Eingangsdaten des dynamischen Regionalmodells REMO verwendet. Letzteres liefert Klimadaten im Stundenzeitschritt und erlaubt damit eine Abschätzung der Entwicklung von Hochwasserextremen auch in kleinen Einzugsgebieten.

Mit dem Wasserhaushaltsmodell PANTA RHEI wird der Betrieb des Talsperrenverbundsystems in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung in für die Klimafolgenforschung geeigneter Weise modelliert.

Das Langzeitkontinuumsmodell soll die quantitative Erfassung des Klimawandel-Einflusses auf die Hochwasserbelastung ermöglichen. Die Änderung der von Hochwasser beeinflussten Nutzungen des Systems muss als Ergebnis der Modellierung quantifizierbar sein. Niedrigwasseraufhöhung braucht hierbei nicht betrachtet zu werden.

Trinkwassergewinnung, Energieerzeugung und Hochwasserschutz müssen mit robusten Methoden ökonomisch bewertet werden. Es sind plausible monetäre Schätzgrößen zu entwickeln, die einen Vergleich auch einer fernen Zukunft mit der Vergangenheit ermöglichen. Eine besondere Herausforderung ist hierbei die monetäre Bewertung der Hochwasserschutzwirkung von Talsperren.

Hochwassermanagement muss im Rahmen aktueller EU-Richtlinien als Hochwasserrisikomanagement interpretiert werden, Risiko entsteht durch das Zusammenwirken von Hochwassergefährdung und Vulnerabilität anthropogener Nutzungen in der Risikozone.

Demografischer Wandel ist als globales Bevölkerungswachstum der eigentliche Antrieb des Klimawandels, als regionaler Bevölkerungsrückgang in ländlichen Regionen Deutschlands hat er Auswirkungen auf das Hochwasserrisikomanagement, da die gefährdeten Werte (die Exposition) von der Bevölkerungsdichte abhängen. Daher müssen Bevölkerungsprognosen für den ländlichen Raum abgeleitet werden.

Um Bevölkerungsprognosen und Exposition zusammenzuführen, ist ein Verfahren erforderlich, das die Ermittlung der Exposition in Abhängigkeit von der Anzahl von Beschäftigten und Anwohnern ermöglicht.

Die Zusammenführung von hydrologischer Modellierung einerseits und sozioökonomischer Analyse andererseits ermöglicht eine ökonomische Bewertung sowohl der Folgen des Klimawandels als auch möglicher Anpassungsmaßnahmen des Hochwassermanagements.

Die wesentlichen Innovationen der vorliegenden Arbeit sind

- die Zusammenführung der zeitlich und räumlich hoch aufgelösten Modellierung im Stundenzeitschritt mit der Optimierung;
- die Entwicklung einer Methodik für die Expositionsermittlung im Rahmen der Risikoanalyse, die die Abbildung des Risikos in Abhängigkeit von Bevölkerungsprognosen erlaubt;
- die Zusammenführung der hydrologischen Modellierung und ökonomischen Analyse zu einer integrierten Bewertung. Dieser weite Bogen wird in der dem Autor nach intensiver Recherche bekannten Literatur in keiner anderen Arbeit gespannt.

1.3 Vorgehensweise und Struktur der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in einen sozioökonomischen und einen hydrologischen Strang; sie werden in einer abschließenden Synopse zusammengeführt (Abbildung 1-1). Diese Struktur ist in Kapitel über das Untersuchungsgebiet, über Beobachtung, Projektion und Simulation des Klimawandels und seiner Auswirkung auf den Wasserhaushalt sowie ein Kapitel über Optimierung von Talsperrenverbundsystemen eingebettet. Die beiden Stränge werden nacheinander behandelt, wobei der sozioökonomische Strang dem hydrologischen vorausgeht.



Abbildung 1-1: Struktur der Arbeit: Ein hydrologischer und ein ökonomischer Strang führen zu einer abschließenden Synopse. Wesentliche Eingangsdaten sind in grauen Pfeilen gezeigt. Zahlen in den Bausteinen weisen auf die jeweiligen Unterkapitel hin.

Die Ableitung plausibler monetärer Schätzgrößen für die Trinkwasser- und Energieerzeugung erfolgt im zweiten Kapitel, in welchem das Untersuchungsgebiet und die Entwicklung des Talsperrenverbundes beschrieben wird. Der Beitrag des Talsperrenbetreibers zum Gemeinwohl - seine Wertschöpfung - wird aus betriebswirtschaftlichen Informationen geschätzt. Mit den in diesem Kapitel ermittelten Kennzahlen kann später die Wertschöpfung einzelner Talsperren geschätzt werden.

Da Bevölkerungsprognosen Grundlage der Emissionsszenarien sind und diese wiederum den Antrieb für modellgestützte Prognosen des Klimawandels bilden, wird der regionale demografische Wandel und die Ermittlung regionaler demografischer Szenarien im dritten Kapitel über die Ursachen des Klimawandels behandelt.

Ein neues Verfahren der Expositionsanalyse wird im sechsten Kapitel über die Ermittlung des Hochwasserrisikos am Beispiel der Ortslage Osterode entwickelt und angewendet. Es basiert auf volkswirtschaftlichen Daten, die Europaweit kostenfrei zur Verfügung stehen. Da Anlagevermögen und Wertschöpfung als wesentliche die Exposition beschreibenden Größen über die Anzahl von Beschäftigten und Anwohnern ermittelt werden, kann das Hochwasserrisiko in Abhängigkeit von unterschiedlichen demografischen Szenarien abgeschätzt werden.

Der hydrologische Strang beginnt im siebten Kapitel mit dem Modellaufbau, gefolgt von der Kalibrierung sowohl eines Modells im Stundenzeitschritt als auch eines Modells im Tageszeitschritt. Der Einsatz in der Klimafolgenforschung erfordert, dass die langfristige Systemcharakteristik des Talsperrenverbundes für einen 30-jährigen Zeitraum der Vergangenheit wiedergegeben wird. Das dabei entstehende Langzeitkontinuumsmodell ist notwendiger Weise eine Abstraktion des tatsächlich existierenden Systems, da letzteres in vergleichsweise kurzen Zeiträumen an Änderungen der Bedarfsseite angepasst wird.

Im achten Kapitel wird die Modellierung der Klimaszenarien der Vergangenheit und Zukunft vorgestellt. Hierbei kommt - entsprechend der zeitlichen Auflösung der Klimamodelldaten - für die WETTREG-Daten das im Tageszeitschritt, für die Klimamodelldaten aus REMO hingegen das im Stundenzeitschritt kalibrierte Modell zum Einsatz. Eine Plausibilisierung zeigt, die Verwendbarkeit von nur einem Lauf von REMO für die Optimierung. Der Einfluss der Klimamodelle auf die Unsicherheit der Ergebnisse kann daher nicht abgeschätzt werden.

Das neunte Kapitel beschreibt die Anpassung des Talsperrenbetriebs an die geänderte zukünftige Hochwasserbelastung mit einem Optimierungsverfahren. Hier wird die technische Leistungsfähigkeit der Talsperren hinsichtlich vergrößerter Hochwasserbelastung modelliert und die Machbarkeit festgestellt.

Ob und in welchem Ausmaß die Anpassung tatsächlich wünschenswert ist, erörtert das zehnte Kapitel anhand einer Zusammenführung der sozioökonomischen und hydrologischen Ergebnisse. Einen konkreten Anpassungsvorschlag an den Klimawandel macht die Arbeit nicht, da ein solcher nur durch die beteiligten Gruppen wie Talsperrenbetreiber, Talsperrenaufsicht und gegebenenfalls weitere Interessenverbände, entwickelt werden kann. Diese könnten sich für diese Aufgabe der in der Arbeit entwickelten Methodik bedienen.

2 Das Untersuchungsgebiet

Als nördlichstes deutsches Mittelgebirge hebt sich der Harz markant von seinem Umland ab. Brocken und Bruchberg sind die höchsten Erhebungen im westlichen Hochharz (Abbildung 2-1). Nördlich und nordwestlich davon liegen vier Talsperren, die in Innerste und Oker, südlich davon zwei, die über die Rhume in die Leine entwässern. Von den nördlichen Talsperren bilden Innerste-, Grane- und Okertalsperre ein komplexes, durch Stollen verbundenes System. Auch von der Radau wird über einen Stollen Wasser der Granetalsperre zugeführt. Die Talsperren dienen in unterschiedlicher Ausprägung der Trinkwasser- und Energiegewinnung, dem Hochwasserschutz, der Niedrigwasseraufhöhung sowie der Erholung. Das Oberharzer Wasserregal, ein vom Mittelalter bis zur Industrialisierung dem Bergbau dienendes Teichsystem, beeinflusst noch heute maßgeblich die Hochwasserentstehung im oberen Einzugsgebiet der Innerste.

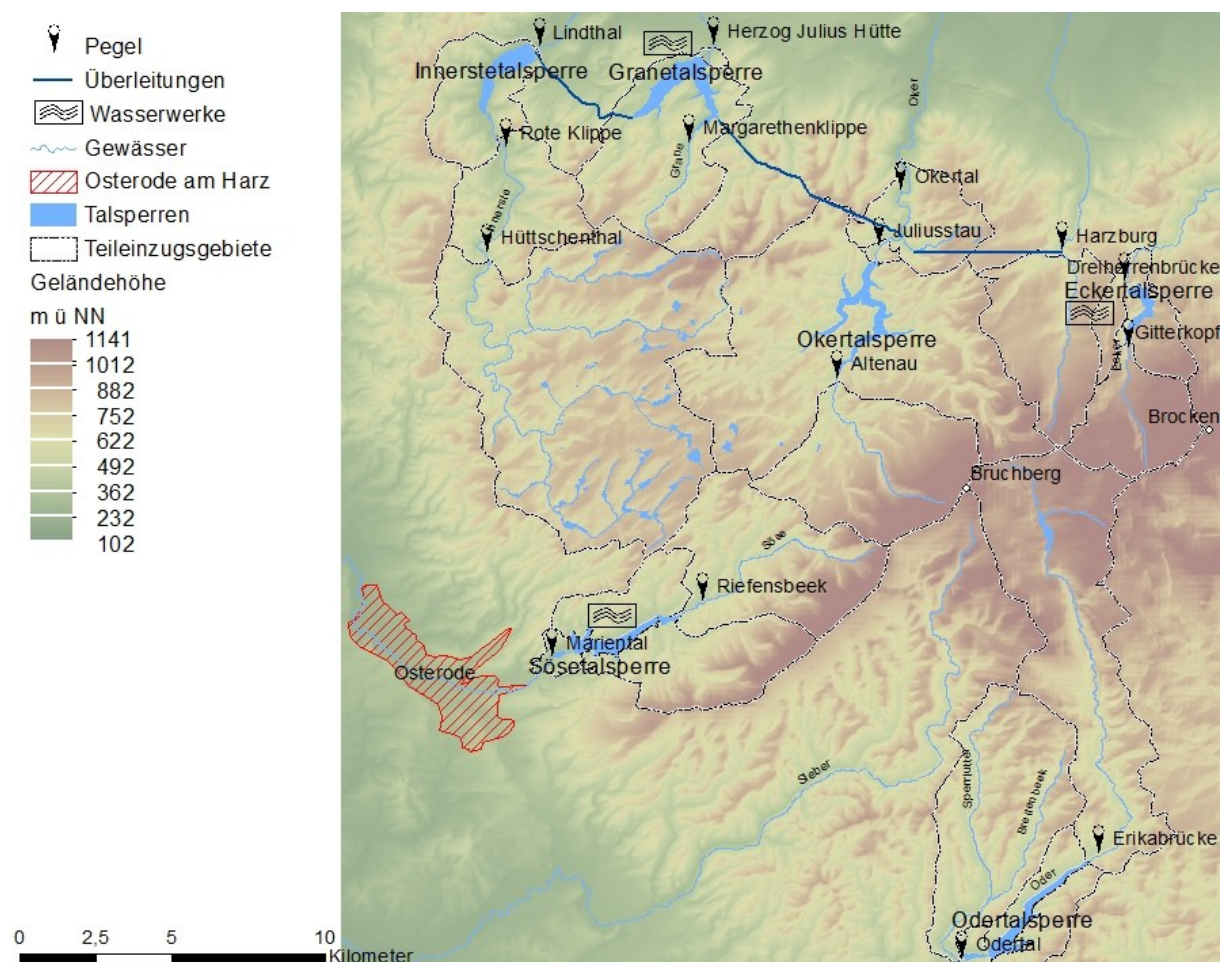


Abbildung 2-1: Das Talsperrenverbundsystem im Westharz. Im Norden befindet sich der Verbund aus Innerste-, Grane- und Okertalsperre mit Überleitungen von der Radau bei Harzburg, am südwestlichen Harzrand die Söse- und Odertalsperre.

Seit der Spätantike spielt die Montanindustrie im Harz eine wichtige Rolle. Sie verband sich im Mittelalter mit der Wasserkraftnutzung. Wegen günstiger hydrografischer Voraussetzungen gewannen mit der Industrialisierung größere Talsperrenbauten an Bedeutung. Anhand von historischen Quellen wird in diesem Kapitel aufgezeigt, wie kritische Erfolgsfaktoren für

Talsperren erkannt wurden und die daraus resultierenden Überlegungen zum heute existierenden und in dieser Arbeit modellierten Talsperrenverbund im Westharz mit seiner Multifunktionalität führten, deren Wirtschaftlichkeit durch die Trinkwassergewinnung gewährleistet wird. Aus einer Analyse der Geschäftsberichte des Talsperrenbetreibers wird eine Schätzung der Wertschöpfung aus dem Talsperrenbetrieb abgeleitet, die später den Vergleich von Hochwasserrisiko und Wertschöpfung aus dem Talsperrenbetrieb erlaubt.

2.1 Hydrografische Voraussetzungen

Die höchsten Niederschläge im Harz fallen an der Nordflanke zwischen dem zu Sachsen-Anhalt gehörenden Brocken (1 141 m ü. NN) und den in Niedersachsen liegenden Harz-Erhebungen Wurmberg (971 m ü. NN) und Bruchberg (927 m ü. NN). Der Gradient der Niederschlagszunahme vom nördlichen Harzvorland bis zum Hochharz übertrifft sogar denjenigen des deutschen Alpenvorlandes. Eine Ursache für diesen hohen Gradienten ist die zunehmende Windgeschwindigkeit in größeren Höhenlagen bei der weit in das norddeutsche Tiefland vorgeschobenen Lage des Harzes. Hinzu kommen Staueffekte infolge seiner herzynischen (westnordwest–ostsüdöstlichen) Ausrichtung. Dem Niederschlagsreichtum des Harzes steht die Regenarmut des umliegenden Tieflandes gegenüber. In weiten Teilen der Börde zwischen Sarstedt (Leine) und Braunschweig fallen weniger als 600 mm Jahresniederschlag (Meier-Hilbert, 2012).

Den höchsten mittleren Niederschlag hat nach Brüning und Uhden (1961, S. 4) der Brocken mit 1 670 mm. Die Höhenzüge selbst zeigen eine recht unterschiedliche Niederschlagsverteilung. Hier werden vor allem die luvseitigen Hänge beregnet, die den vorherrschenden Westwinden ausgesetzt sind. Auf den Osthängen dagegen gehen die Niederschläge stark zurück. Die langjährigen Beobachtungen der Harzwasserwerke für den Zeitraum 1941-2010 ergeben, wie in Abbildung 2-2 gezeigt, für den Brocken mittlere jährliche Niederschläge von etwas über 1700 mm/a und für den Bruchberg etwas über 1600 mm/a.

Nach Untersuchungen der „Gesellschaft zur Förderung der Wasserwirtschaft im Harze“ (GFWH, 1905) fallen die bedeutendsten Hochwässer der Oker in die heiße Jahreszeit, besonders in den Juli. Sie werden durch starke Gewitterregen erzeugt, die bis zu 100 mm Niederschlag in 24 Stunden erreichen können. Diese Intensitäten bestätigt auch Tonn (1982) und grenzt den Zeitraum ihres Auftretens auf Anfang Juni bis Mitte August ein. Die Fülle erreicht aber auch bei außerordentlich großen Hochwässern infolge Gewitter weniger als 10% des Jahresabflusses. Am häufigsten treten nach GFWH (1905) Hochwässer im März auf, die manchmal den Sommerhochwässern im Scheitel nahe kommen und „hauptsächlich vom Schmelzen der im Gebirge angesammelten Schneemassen“ herrühren. Brüning und Uhden (1961) stellen fest, dass die zeitliche Verzögerung der Schneeschmelze zwischen den tiefen und den hohen Lagen für die Verteilung des Wasserabflusses günstig ist. Sie weisen weiter darauf hin, dass die höchsten Winterhochwässer im Allgemeinen bei gefrorenem Boden entstehen, „wenn zu dem in Eis und Schnee aufgespeicherten Wasser bei Tauwetter mit schnellem Temperaturanstieg noch Regen hinzukommt“, also bei Regen-auf-Schnee-Ereignissen. Dass Taufluten besonders hohe Abflüsse hervorrufen, bestätigt Tonn (1982) und ergänzt, dass deren Fülle 25 bis 33% des Jahresabflusses erreichen kann.

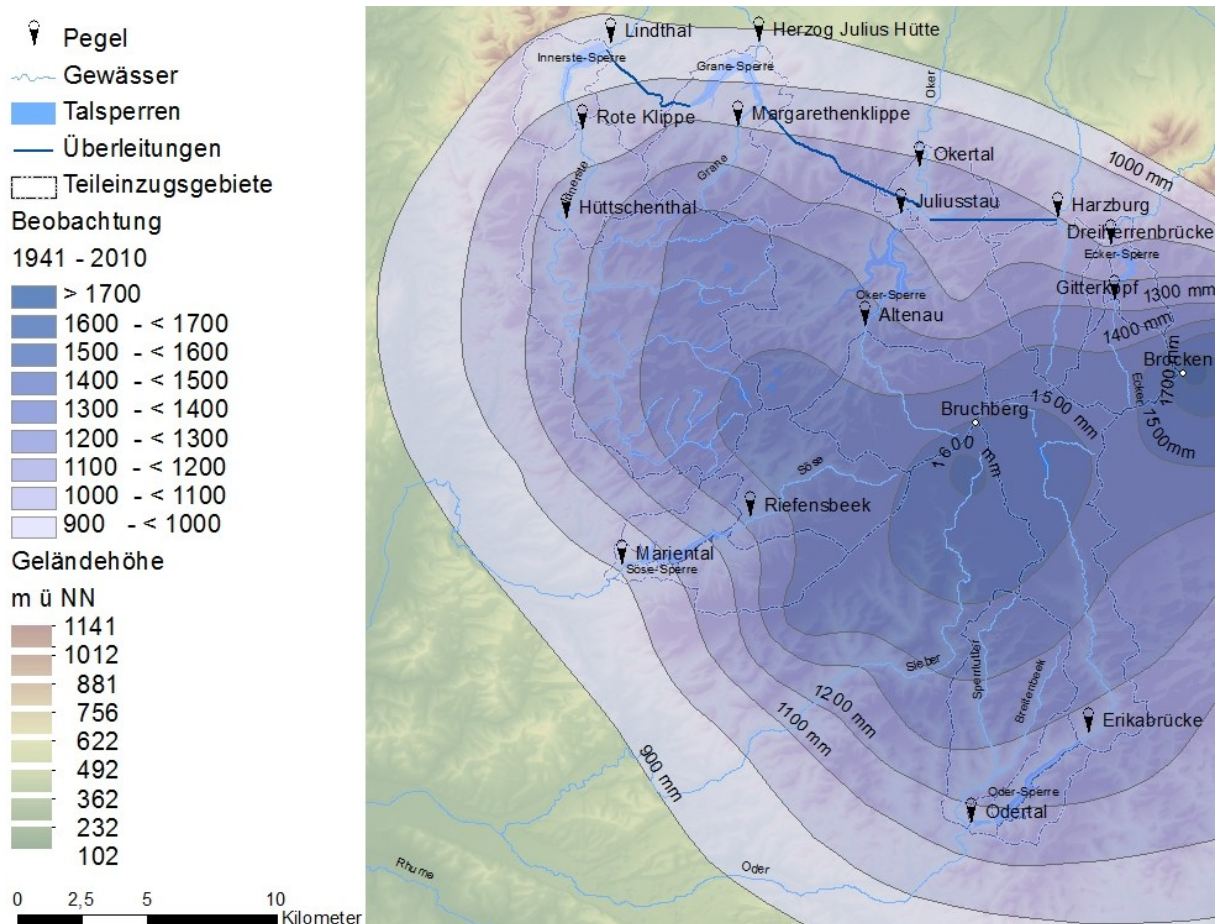


Abbildung 2-2: Langjährige mittlere Niederschlagsverteilung im Westharz. Die höchsten Niederschläge fallen zwischen Brocken und Bruchberg. Daten der Harzwasserwerke für den Zeitraum 1941-2010 (Eggelsmann und Lange, 2011, verändert).

Die Talsperren waren in der Vergangenheit im Hochwasserschutz sehr effektiv. Die Sösetalsperre konnte 94% der Hochwässer soweit zurückhalten, dass durch die Abgabemengen allein im Vorland keine Ausuferung mehr stattfand. Bei der Okertalsperre beträgt der entsprechende Wert sogar 96%, für Oder- und Sösetalsperre, einen Sonderfall ausgenommen, 79%: Im Januar 1948 ist an der Odertalsperre der bisher stärkste Spitzenzufluss mit $98 \text{ m}^3/\text{s}$ aufgetreten. Wegen eines Unglücksfalls an der Hochwasserentlastung stieg die Abgabe kurzzeitig auf etwa $160 \text{ m}^3/\text{s}$. 1981 kam es im Gebiet der Oder und Leine im März und Juni zu sehr großen Hochwasserschäden, die dafür verantwortlichen Wassermassen stammten allerdings aus den von den Talsperren unbeeinflussten Einzugsgebieten von Sieber, Sperrlutter und Lutter (Tonn, 1982). An allen Talsperren traten Entlastungsereignisse auf.

Ein angesichts der vorgenannten Sachverhalte ungewöhnliches Hochwasser ereignete sich im Herbst 2007. Zwischen dem 27. und 29. September fielen im Harzgebiet und im Harzvorland bis zu 200 mm Regen auf bereits wassergesättigte Böden. An der Innerstetalsperre erreichte der Spitzenzufluss über $60 \text{ m}^3/\text{s}$, die Spitzenabgabe lag bei rund $33 \text{ m}^3/\text{s}$. Obwohl die Aufnahmekapazität der Innerstetalsperre schließlich erschöpft war, hat der Hochwasserschutz dennoch erfolgreich funktioniert. Einerseits wurde die zufließende Hochwasserspitze deutlich gedämpft, andererseits wurde die Abgabe so wirksam verzögert, dass es im Harzvorland nicht zu einer unerwünschten Überlagerung aus der Talsperrenabgabe und den Hochwasserspitzen der Gewässer im Harzvorland kam (HWW, 2007). Im Harzvorland den-

noch auftretende Hochwasserschäden waren auf dort gefallene Niederschläge zurückzuführen.

Am 27. Mai 2013 bewahrte die Innerstetalsperre Hildesheim vor einem Übersteigen des Rekordpegelstandes von 6,75 m aus dem Jahr 2007 am Pegel Heinde, rund 45 km unterhalb der Talsperre. Ohne den Hochwasserschutzraum der Talsperre im Oberlauf hätte der Pegel diese Marke überschritten, durch die Talsperre konnte der Hochwasserstand auf 6,42 m begrenzt und damit um 33 cm niedriger gehalten werden (Bodnar, 2013).

2.2 Geschichte der wirtschaftlichen Wassernutzung im Westharz

Die Geschichte der wirtschaftlichen Wassernutzung lässt sich in eine Periode der Teichbewirtschaftung seit dem 12. Jahrhundert und in eine Periode der Talsperrenbewirtschaftung ab dem 20. Jahrhundert gliedern. Da die seit 2010 als UNESCO Weltkulturerbe unterhaltenen Teiche des Oberharzer Wasserregals bis heute den Wasserhaushalt des Westharzes beeinflussen, widmen sich die folgenden Abschnitte beiden Perioden.

2.2.1 Teichwirtschaft

Die wirtschaftliche Wassernutzung im Westharz beginnt mit der Stiftung des Klosters Walkenried im Jahr 1127 durch Adelheid von Clettenberg. Zur Entwicklung des Familienbesitzes lud sie die Zisterzienser ein, die sich seit ihrer Gründung 1098 durch Robert von Molesne in Cîteaux in der Landeskultivierung einen Namen gemacht hatten. Nachdem Kaiser Lothar III 1132 die Stiftung bestätigte, wendete sich der Orden zunächst der Trockenlegung der Sümpfe am südlichen Harzrand zu, um ab 1150 seine wasserwirtschaftlichen Kenntnisse in das Montanwesen einzubringen (Kloster Walkenried.de).

Die Gewinnung von Metallen im Westharz hatte zu dieser Zeit bereits eine lange Geschichte. Ein archäologischer Nachweis bergbaulicher Aktivitäten aus dem dritten bis vierten Jahrhundert gelang durch den Fund eines Verhüttungsplatzes am südwestlichen Harzrand bei Osterode (Brockner, 1992). Bergbau in größerem Maßstab ist jedoch mit erheblichem energetischem Aufwand für die Trockenhaltung der Stollen sowie die Zerkleinerung von Erzen verbunden. Im Mittelalter konnten diese Prozesse nur durch den Einsatz von Wasserkraft mechanisiert werden.

Der Nachweis der Nutzung von Wasserrädern zum Antrieb von Blasebälgen für die Erzverhüttung gelang Blaich (2005) für das 13. Jahrhundert: Mönche und Laienbrüder des Klosters Walkenried betrieben eine Erzhütte im Pandelbachtal südöstlich von Seesen. Zu dieser Zeit dominierte das Kloster den Bergbau im gesamten Gebiet des Westharzes. Durch die Pest in der Mitte des 14. Jahrhunderts, möglicherweise aber auch durch technologische Begrenzungen bei Schachttiefen ab 60 m, kam der Bergbau im Harz zum Erliegen. Das Kloster Walkenried veräußerte die bergbaulichen Liegenschaften und wendete sich Bankgeschäften zu (Kloster Walkenried.de).

Am Wiederaufleben des Bergbaus im 16. Jahrhundert war das Kloster nicht mehr beteiligt. Der größere Teil der 149 dokumentierten Teiche entstand in diesem und dem folgenden

Jahrhundert. Aus dieser Zeit stammt auch die Bezeichnung Oberharzer Wasserregal: Hinter dem Begriff verbirgt sich ein vom Landesherrn verliehenes Recht (Regal): Mit dem Recht, Bergbau zu betreiben (Bergregal), war die Verleihung des Wasserregals verbunden, um das für den Betrieb von Förder-, Pump- und Verhüttungsanlagen erforderliche Aufschlagwasser zu beschaffen. Für den Landesherrn war dies eine sehr einträgliche Regelung. Im 17. und 18. Jahrhundert, der Blütezeit des Bergbaus im Westharz, stammten zeitweise 70% der Steuereinnahmen des Königreichs Hannover aus dem oberharzer Bergbau. Mit der Zeit ging der Name des Rechts auf die damit verbundenen wasserbaulichen Anlagen über (Teicke, 2011).

Mit dem 1714 bis 1721 erbauten Oderteich (GFWH, 1905) fand die Teichwirtschaft ihren Höhepunkt. Sein Stauraum von 1,67 Mio. m³ wird von der wohl ältesten Staumauer Deutschlands, errichtet aus Granitblöcken und Granitgrus, begrenzt. Er diente in Verbindung mit dem Rehberger Graben der Versorgung des Bergbaus in Sankt Andreasberg (Meier-Hilbert, 2012).

Im 19. Jahrhundert setzte der Niedergang des Bergbaus ein, eine wirtschaftliche Förderung war angesichts der niedrigen Metallpreise auf dem zwischenzeitlich entstandenen Weltmarkt nicht mehr möglich. Etwa bis 1930 erfolgte in fast allen Oberharzer Bergstädten die Stilllegung des Bergbaus (Teicke, 2011).

Teile des Wasserregals wurden für die Energieerzeugung nachgenutzt. Seit 1910 erzeugt eine 240 kW-Turbine in der Grube Samson unter Sankt Andreasberg Energie mit Wasser, das ihr aus dem Oderteich über den Rehberger Graben zu- und durch den Sieberstollen in die Sieber abgeleitet wird. Andere Teile des Wasserregals fanden im Hochwasserschutz eine neue Verwendung. Im Oberlauf der Innerste befinden sich heute 53 Teiche mit einem Gesamtvolumen von rund 7 Mio m³, die die Hochwasserscheitel deutlich dämpfen. 15 dieser Teiche sind mit Volumen zwischen 88 000 (Oberer Flambacher Teich) und 599 000 m³ (Hirschler Teich) und Dammhöhen von 6,5 bis 11,4 m als Talsperren der Klasse 2 nach DIN 19700 (2004) ausgewiesen und müssen daher bezüglich Standsicherheit und Leistungsfähigkeit der Hochwasserentlastung unterhalten werden (Teicke, 2011).

Fünf Teiche im Einzugsgebiet der oberen Innerste dienen der lokalen Trinkwasserversorgung. Drei weitere Teiche werden für den Badebetrieb genutzt. Acht Teiche dienen wegen ihrer Besiedelung mit sehr seltenen Tieren und Pflanzen dem Natur- und Artenschutz (Teicke, 2011).

2.2.2 Talsperrenwirtschaft

Anfang der Neunzigerjahre des 20. Jahrhunderts begannen Bestrebungen, größere Anlagen zur Gewinnung von Energie im Harz zu errichten. Eine von Recken et al. (1895) ausgehende Initiative zum Bau einer Talsperre im Sösetal mit einem Stauraum von 1,5 Mio m³ zu geschätzten Baukosten von 550 000 Mark scheiterte zunächst, trotz Unterstützung durch das Königliche Meliorationsbauamt. Auf Anregung der Königlich Preußischen Landesanstalt für Gewässerkunde wurde daraufhin 1905 die „Gesellschaft zur Förderung der Wasserwirtschaft im Harze“ (GFWH) gegründet (Zimmermann, 1941). Im Folgenden wird aus den Protokollen

der Generalversammlungen von 1905, 1908 und 1911 zitiert, um die Entwicklung bis zum Vorabend des ersten Weltkriegs nachzuzeichnen.

Zielsetzung der Gesellschaft war zunächst die Erreichung einer geordneten Wasserwirtschaft im Okergebiet, orientiert an der Preußischen Gesetzgebung von 1879 zur Bildung freier oder öffentlicher Wassergenossenschaften (GFWH, 1905). Auf dieser Grundlage waren im Einzugsgebiet der Wupper durch die Wuppertalsperren-Genossenschaft zwischen 1891 und 1900 bereits fünf Talsperren errichtet worden. Die 1891 durch den Geheimrat und Aachener Professor Otto Intze (1843 - 1904) errichtete Eschbachtalsperre in Remscheid mit einem Stauraum von rund einer Million m³ galt dabei als erste Trinkwassertalsperre im Deutschen Reich. Die Ruhrtalsperren-GmbH hatte mit einem Stammkapital von fünf Mio Mark¹ in Zusammenarbeit mit lokalen Talsperren-Genossenschaften zwischen 1901 und 1905 bereits drei Talsperren errichtet (Tabelle 2-1)(GFWH, 1905).

Tabelle 2-1: Frühe Talsperrenbauten im Deutschen Reich.

Wuppertalsperren-Genossenschaft	Ruhrtalsperren-GmbH
Bevertalsperre 1898	Hennetalsperre 1901 – 1905
Eschbachtalsperre 1891	Ennepetalsperre 1902 – 1904
Panzertalsperre 1891 - 1893	Fürwiggetalsperre 1902 – 1904
Lingesetalsperre 1899	
Ronsdorfer Talsperre 1898 - 99	

Als Argument mit der stärksten öffentlichen Wirkung führte die Gründungsversammlung der GFHW von 1905 die Hochwässer der Oker an, die in Braunschweig Abflüsse bis zu 250 m³/s und an der Mündung in die Aller bis zu 300 m³/s erreichten. Aber auch viele kleinere Ereignisse verursachten beinahe jährlich erhebliche Schäden an landwirtschaftlich genutzten Flächen, seltener in Ortslagen, zum Beispiel in Wolfenbüttel etwa 50 000 Mark im Juli 1898, sowie an Brücken, Schleusen, Dämmen und Uferbefestigungen. Niedrigwasser führte vor allem in Industriebetrieben wie Mühlen, Zuckerfabriken und Verhüttungsbetrieben zu Produktionseinbußen bis hin zum Stillstand (GFWH, 1905).

Große Industriebetriebe im Ruhgebiet gewannen die zur Produktion erforderliche Energie aus Steinkohle und hatten damit durch die ständige Verfügbarkeit von Energie einen wichtigen Wettbewerbsvorteil. Kleinere Betriebe an der Oker gaben an, dass ein „regelmäßiger voller Wasserzufluss“ die Produktivität um 20 bis 30 Prozent erhöhen könne. Auf „Hilfsdampfkraft“ könne dann verzichtet werden. Die Elektrifizierung der Produktion galt als weiterer wichtiger Faktor zur Produktivitätssteigerung (GFWH, 1905).

Auch wenn Wasserversorgung als Nutzung mit aufgeführt wurde, sollte sich die Rentabilität der vorgeschlagenen Talsperren allein aus der Energieerzeugung ergeben. In der Gründungsversammlung wurden Projekte für die Oker bei Romkerhall (Stauraum S 30 Mio m³) sowie für ihre Nebenflüsse Ecker (S 7,5 Mio m³) und Radau (S 4 Mio m³) vorgestellt (GFWH, 1905).

¹ Eine Goldmark zwischen 1900 und 1911 entspricht in grober Näherung fünf Euro im Jahr 2010

Auch die Landschaftsästhetik fand Berücksichtigung, wobei vor allem auf die verschönernde Wirkung der Wasserspiegel der vorhandenen Teiche hingewiesen wurde. Dass die Einfügung großer Dammquerschnitte in die Landschaft neue und schwierige Anforderungen stellte, wurde wohl erkannt. Jedoch wurde die Staumauer der Eschbachtalsperre selbst als eines der „besuchtesten und beliebtesten Ausflugsorte des an landschaftlichen Reizen keineswegs armen Bergischen Landes“ (GFWH, 1905) genannt.

In den nächsten drei Jahren widmete sich die GFWH der Grundlagenerhebung und weiterer Vorplanungen. Es wurden 25 „Regenmeßstationen“ und 39 „Pegelmeßstationen“ eingerichtet und Regeln für deren Aufstellung und Beobachtung erlassen (GFWH, 1908a). Vereinzelt mussten Fischtreppe beschafft werden, die während der „Steigezeit“ der Fische bei niedrigem Wasserstand gelegt werden sollten (GFWH, 1908b).

Der Optimismus von 1905, Talsperren allein durch Energieproduktion finanzieren zu können, war, wohl weil die Erhebung möglicher Abnehmer nur einen sehr begrenzten Kreis ergab, gewichen. Man ging 1908 davon aus, dass die Rentabilität der Talsperren zwar in erster Linie auf der Verwertung der Wasserkraft beruhe. Es sei jedoch gerechtfertigt, „auch die mannigfachen sonstigen Vorteile der Talsperren zu schätzen und in Rechnung zu stellen, wenn sich anders die Rentabilität nicht nachweisen ließe“ (GFWH, 1908b).

Mit Fragebögen wurde daher versucht, Hochwasserschäden der Vergangenheit zu quantifizieren. Die Schadenerhebungen sollten sich nicht auf den gewerblichen Bereich beschränken, sondern auch auf den öffentlichen und privaten Bereich ausgedehnt werden. Auch indirekte Schäden, wie Beeinträchtigungen des produktiven Wertes von landwirtschaftlichen Flächen, unentgeltlich geleisteten privaten Beihilfen oder Unterstützungen aus öffentlichen und privaten Mitteln, sollten erfasst werden (GFWH, 1908b). In den Unterlagen der GFHW finden sich allerdings keine Ergebnisse von Schadenerhebungen.

Da nicht mehr erwartet wurde, dass sich die Rentabilität der Talsperren aus der Energieerzeugung allein ergeben würde, sondern mit dem Hochwasserschutz Aspekte der öffentlichen Daseinsvorsorge in den Vordergrund rückten, wurden die rechtlichen Rahmenbedingungen als unzureichend kritisiert. Ein einheitliches Wassergesetz existierte nicht, es lag jedoch seit 1894 ein Entwurf vor. Das oben genannte Preußische Gesetz von 1879 bezüglich der Bildung von Wassergenossenschaften zielte auf den gewerblichen Bereich und deckte damit Ziele der öffentlichen Daseinsvorsorge nicht ab. Daher beschloss die Gesellschaft, mit einer Denkschrift auf die Königlich Preußische und Herzoglich Braunschweigische Regierung bezüglich der Einrichtung einer geordneten Wasserwirtschaft, insbesondere des Erlasses von Hochwasserschutzgesetzen, einzuwirken (GFWH, 1908b). Die Landesanstalt für Gewässerkunde befürwortete die Denkschrift. Dies führte zur Einrichtung einer durch Königlich Preussische Beamte geführten technischen Abteilung bei der GFWH in Braunschweig. Die Zuständigkeit der Gesellschaft wurde auf den Ostharz bzw. das Herzogtum Anhalt ausgedehnt. Von den Gesamtausgaben der Gesellschaft in Höhe von 40 000 Mark (1911/12) trugen die nunmehr drei beteiligten Regierungen 36 000 Mark, 26 000 Mark davon die Preußische Regierung (GFWH, 1911).

Ausdrücklich begrüßt wurden Bestrebungen der Leine- und Innersteanlieger zur Gründung einer Organisation für das Flussgebiet der Leine und ihrer Quellflüsse zum „Ausgleich der Interessen der Ober- und Unterlieger“. Der „Zusammenschluss nach Flusssystemen“ ge-

währleiste am besten die „einheitliche systematische Bearbeitung ganzer Flusssysteme“ (GFWH, 1911). Dies ist eine Erkenntnis, die erst mit der Verabschiedung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (Richtlinie 2000/60/EG) rechtlich verbindlich wurde.

Für zahlreiche Talsperrenstandorte waren die Planungen zwischenzeitlich weit gediehen. Insgesamt plante die Gesellschaft 1911 die Einrichtung von 253,7 Mio m³ Stauraum, verbunden mit geschätzten Investitionen von 69,25 Mio Mark (Tabelle 2-2) (GFWH, 1911, S. 20). Die in der Quelle angegebenen spezifischen Kosten von 27,3 Pfennig je m³ Stauraum lassen sich aus den Angaben nicht nachrechnen. Der Mittelwert liegt vielmehr bei 41 Pfennig (Tabelle 2-2, letzte Spalte). Es fällt auf, dass insbesondere kleine Talsperren sehr hohe spezifische Kosten aufweisen.

Dementsprechend fiel ein ökonomisches Gutachten des externen Beraters Prof. Holz aus Aachen aus. Er stellte fest, dass offenbar in jedem größeren Tal des Harzes der Bau einer Talsperre geplant sei. Damit würde der Bau von Talsperren leicht zum Selbstzweck, diese sei wirtschaftlich ungesund (GFWH, 1911, S. 45).

Tabelle 2-2: Talsperrenplanungen im Westharz (a) und Ostharz (b), Stand 1911 (GFWH, 1911).

Standort		Stauraum	Investition	Mark/m ³
		Mio m ³	Mio Mark	
Bode (b)	Bode	53,4	16,5	0,31
	Holtemme	2,1	2,1	1,00
	Zillierbach	4	2,75	0,69
	Drämbach	1,8	1,8	1,00
	Selke	20	4,4	0,22
Oder (a)	Oder	22	5,79	0,32
	Sieber	18	4,9	0,27
	Söse	6	2	0,33
Innerste (a)		31,8	5	0,16
Oker (a)	Oker	26	7,1	0,27
	Ecker	8,3	3,3	0,40
	Okerstauweiher	42,3	7	0,17
Wipper (b)	Eine Wipper	8	2,6	0,33
	Wipper	10	2,8	0,28
Summe/Mittel*		253,7	69,25	0,41*

Die spezifischen Kosten nach Tabelle 2-2 hielt Holz für zu niedrig angesetzt und dennoch hoch. Er nannte spezifische Kosten für Talsperren in Deutschland, die zwischen 10 Pfennig (Urfttalsperre, S 46 Mio m³) und 170 Pfennig (Talsperre Ronsdorf, S 0,3 Mio m³) lagen. Bezogen auf den Hochwasserschutz dürften die Investitionen in Talsperren das fünf- bis sechsfache des mittleren jährlichen verhinderten Hochwasserschadens betragen.

Durch Talsperren allein werde der Hochwasserschutz allerdings nicht erreicht, es seien auch umfangreiche flussbauliche Maßnahmen notwendig, die nach in Schlesien gemachten Erfahrungen 70% der Gesamtkosten betrügen. (GFWH, 1911, S.31).

Die spezifischen Kosten der Energieerzeugung hielt Holz für so hoch, dass sie dem Wettbewerb mit „Brennkraftkosten“ nicht standhalten würden. Die Baukosten pro PS (0,74 KW) in Wasserkraft lägen nach den Angaben der Gesellschaft zwischen 3 000 und 11 000 Mark. Bei der Urftalsperre hätten die Baukosten pro PS lediglich 1 500 Mark betragen. Für Kraftwerke mit fossilen Brennstoffen hingegen betrügen Bau- und Betriebskosten pro KW zwischen 2 000 und 7 500 Mark. Die wesentlich längere Nutzungsdauer einer Talsperre rechtfertige aber Baukosten bis zum Sechsfachen der Baukosten von Kraftwerken für fossile Brennstoffe (GFWH, 1911, S. 39).

Einen Betrieb von Wasserkraftwerken im Verbund mit fossilen Kraftwerken hielt Holz für vorteilhaft, da Wasserkraftwerke Bedarfsschwankungen viel besser ausgleichen könnten, als die auf Dauerbetrieb angelegten fossilen Kraftwerke (GFWH, 1911, S. 41). Er empfahl den Verzicht auf den Bau kleiner Talsperren. Zur Reduktion von Baukosten sollte die Errichtung von Erddämmen in Erwägung gezogen werden (GFWH, 1911, S. 32). Im Allgemeinen sei die Wasserversorgung der beste Kostenträger bei Talsperrenunternehmungen, wie das Beispiel des Ruhrvereins oder die Talsperre der Stadt Nordhausen gezeigt habe (GFWH, 1911, S. 29).

Die technische Abteilung der GFHW legte 1913 Pläne für eine Vergrößerung des Oderteiches, den Bau der größeren in Tabelle 2-2 genannten, sowie eine Radau- und Ilse-Sperre vor. Die Arbeiten kamen jedoch kriegsbedingt zum Erliegen (Zimmermann, 1941, S. 3).

2.2.2.1 Baubeginn durch die Harzwasserwerke der Provinz Hannover

Sowohl die 1921 von Prof. Franzius gegründete Wasserwirtschaftliche Gesellschaft Hannover e.V. als auch das Talsperrenneubauamt Goslar nahmen nach dem ersten Weltkrieg die Planungen wieder auf. Nach Schmidt (1991) bedurfte es aber eines katastrophalen Hochwasserereignisses, um aus dem Planungs- in das Realisierungsstadium einzutreten:

Am 27. Dezember 1925 leiteten ein Warmlufteinbruch und heftige Niederschläge auf eine über den ganzen Dezember gewachsene Schneedecke eine „Tauflut“ ein, die zu Abflüssen von 113 m³ am Pegel Juliusstau der Oker im Harz führten. Am Pegel Ohrum, der bei einem Einzugsgebiet von 813 km² alle Harzzuflüsse der Oker erfasst, wurde mit 150 m³/s ebenfalls ein bis heute nicht mehr erreichter Spitzenabfluss gemessen (Tonn, 1982, S. 115). Dieses Hochwasser und eine nachfolgende Typhus-Epidemie sowie die Trockenheit des Sommers 1926 gaben nach Schmidt (1991) den Anstoß zur Gründung des Westharzbüros, aus dem 1928 die Harzwasserwerke der Provinz Hannover hervorgingen.

Von 1928 bis 1931, 33 Jahre nach Vorliegen der ersten Planungen, wurde als erste große Sperre der Sösedamm gebaut. Offensichtlich hatten die ökonomischen Überlegungen der GFWH von 1911 Früchte getragen: Ein Damm, nicht eine Staumauer, wurde gewählt, um mittels einer 200 km langen Fernleitung Bremen und eine Anzahl weiterer kleinerer Orte mit bis zu 12 Mio m³ Trinkwasser jährlich zu versorgen. Es folgte von 1931 bis 1934 der Bau der

Odertalsperre als Pumpspeicherkraftwerk. Im Ostharz war 1938 Baubeginn der Rappbode-talsperre (S 109,08 Mio m³), im Westharz wurde im selben Jahr die Errichtung der Eckertalsperre in Angriff genommen. Sie sollte das Volkswagenwerk und die „Stadt des Volkswagens“, heute Wolfsburg, sowie die Herman-Göring-Werke in der gleichnamigen Stadt, heute Salzgitter, versorgen. Vorbereitungen zum Bau der Okertalsperre als größtem Talsperrenbauwerk im Westharz begannen 1939 bei Romkerhall, der Entwurf für eine Siebertalsperre erlangte Baureife (Zimmermann, 1941, S. 7f). Die Eckertalsperre ging im Jahr 1942 in Betrieb (HWW, 1980), die Arbeiten an den anderen Talsperrenprojekten wurden kriegsbedingt eingestellt.

2.2.2.2 Vervollständigung des Systems durch die Harzwasserwerke des Landes Niedersachsen

Nach der Gründung des Landes Niedersachsen 1946 firmierten die Harzwasserwerke der Provinz Hannover in die Harzwasserwerke des Landes Niedersachsen um. Im Lauf der nächsten 35 Jahre erreichte das System seinen heutigen Zustand. Eine schematische Darstellung zeigt die Meon und Gocht (2012) entnommene Abbildung 2-3.

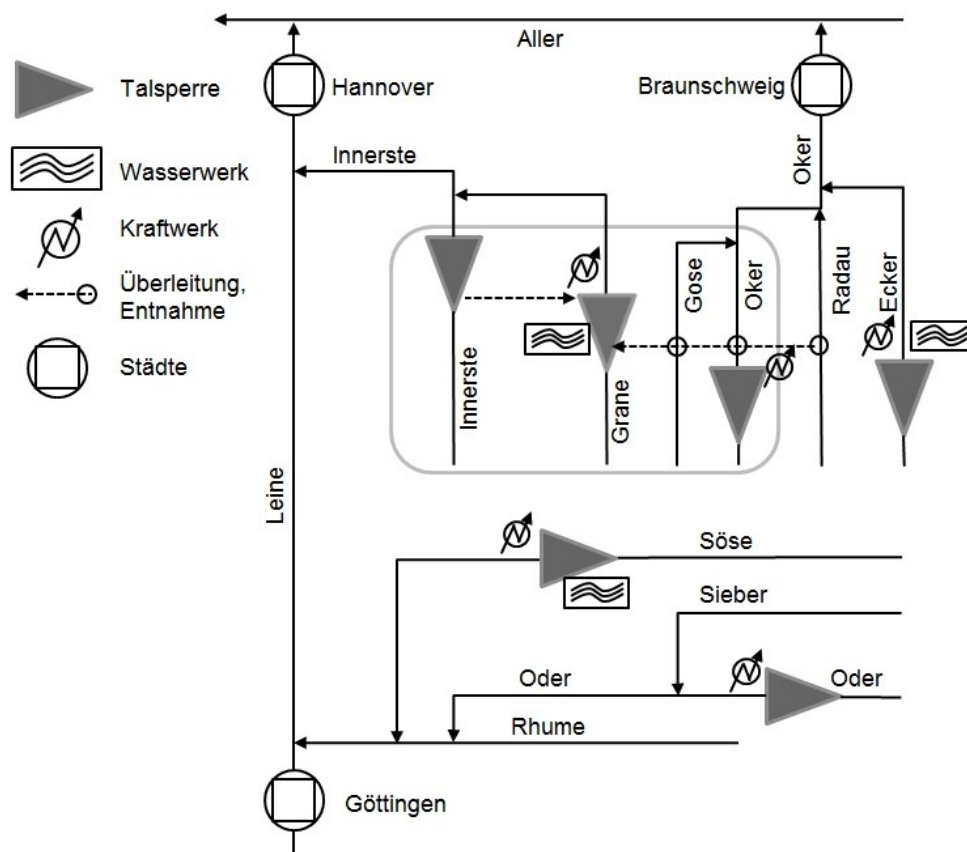


Abbildung 2-3: Schematische Darstellung des Talsperrensystems im Westharz. Ein Überleitungssystem fasst Innerste-, Grane- und Okertalsperre zur Nordgruppe zusammen (Meon und Gocht, 2012, verändert).

Die Okertalsperre wurde als Bogengewichtsstaumauer von 1952 bis 1956 realisiert (HWW, 1970). In den Jahren 1963 bis 1966 folgte die Errichtung der Innerste-Talsperre (HWW, 1985). Die von 1966 bis 1969 errichtete Granetalsperre war bis heute der letzte Talsperrenbau im Westharz. Als Ergänzung der Okertalsperre stellt sie zusätzlichen Stauraum für das

zuvor oft nicht nutzbare Okerwasser zur Verfügung, welches ihr durch den von 1968 bis 1970 erbauten Oker-Grane-Stollen zugeleitet wird. Eine Pumpleitung erlaubt weiterhin die Überleitung von Wasser aus der Innerste- in die Granetalsperre. Das mit dem Bau der Talsperre errichtete Wasserwerk ist mit einer maximalen Jahresleistung von 46 Mio m³ das größte der Harzwasserwerke (HWW, 1976). Mit der Inbetriebnahme des Radau-Stollens 1981 war die Entwicklung des heute bestehenden Talsperrenverbundsystems im Westharz abgeschlossen.

Die Tabelle 2-3 stellt einige Kenngrößen zur Diskussion des Systems dar. Die erste Spalte zeigt den Zuflusspegel, die zweite Angaben zur Einzugsgebietsgröße. Drei Angaben zur Größe des Einzugsgebiets sind möglich: a) das Einzugsgebiet am Zuflusspegel, zweitens das Einzugsgebiet a) zuzüglich der die Talsperre umgebenden und direkt in sie entwässernden Teilgebiete und drittens das Einzugsgebiet b) zuzüglich der Gebiete, aus denen die Überleitungen in die Talsperre stammen. Die zweite Spalte zeigt das Einzugsgebiet zu a) und in Klammern das Einzugsgebiet zu b) oder c). Die dritte Spalte zeigt den Gesamtstauraum, die vierte den Zufluss bezogen auf die in Klammern gegebene Angabe zum Einzugsgebiet. Die fünfte Spalte schließlich enthält den Ausbaugrad, dessen Definition Gleichung 1 zeigt.

$$\beta = \frac{S}{jMQ} \quad 1$$

Hierbei ist S der Stauraum und jMQ der langjährige mittlere Zufluss.

Tabelle 2-3: Kennwerte der Talsperren im Westharz. Erläuterungen der Angaben zur Einzugsgebietsgröße im Text.

Speicher: Zuflusspegel	Einzugsgebiet [km²]	Stauraum [Mio m³]	Zufluss jMQ [Mio m³/a]	Ausbaugrad β [-]
Innerste: Rote Klippe	85,0 (97,0 ^b)	20	60,0	0,33
Grane: Margarethenklippe	6,7 (227 ^c)	46,39	55,0	0,84
Oker: Altenau	31,2 (85,0 ^b)	47,37	75,0	0,63
Ecker: Gitterkopf	11,7 (19,0 ^c)	12,60	15,6	0,81
Söse: Riefensbeek	24,2 (49,0 ^b)	25,50	39,0	0,65
Oder: Erikabrücke	43,6 (74,0 ^c)	30,61	54,0	0,57
Summe		162,47		

Die Innerstetalsperre ist die im Vergleich zu ihrem Einzugsgebiet kleinste Talsperre, sie weist einen Ausbaugrad von nur 0,33 auf. Das Gegenteil trifft auf die Granetalsperre zu. Bezogen auf ihr Einzugsgebiet von nur 6,6 km² und einen mittleren jährlichen Zufluss aus demselben von 15 Mio m³ beträgt ihr Ausbaugrad 3,1. Einschließlich der Überleitungen steigt ihr jMQ auf die in Tabelle 2-3 angegebenen 55 Mio m³/a. Hierauf bezieht sich auch die Angabe des Ausbaugrades. Vom Wasserwerk an der Granetalsperre führt die Fernleitung Grane/West Trinkwasser den Städten Hildesheim und Hannover und die Fernleitung Grane/Ost den Städten Goslar, Braunschweig und Wolfsburg zu. Während der vorwiegende Zweck der Granetalsperre die Trinkwassergewinnung ist, stand bei der Okertalsperre stets der Hochwasserschutz im Vordergrund. Sie weist neben der größten Energieerzeugung (10,2 GWh/a) auch den größten Stauraum unter den Talsperren des Westharzes auf.

Die Eckertalsperre ist die vom Stauraum her kleinste Talsperre. Ihr Wasserwerk versorgt mit maximal 14 Mio m³/a eine Fernleitung nach Wolfsburg. Die Sösetalsperre weist ein größeres Wasserwerk auf, das mit maximal 17 Mio m³/a zwei Fernleitungen nach Göttingen (Söse Süd) und Bremen (Söse Nord) beschickt. Die Odertalsperre schließlich dient vorwiegend der Energieerzeugung (7,6 GWh/a). Funktionen aller Talsperren sind weiterhin der Hochwasserschutz und die Niedrigwasseraufhöhung. Talsperren ohne Wasserwerk haben zusätzlich eine Erholungsnutzung. Insgesamt weisen die Talsperren des Westharzes einen Gesamtstauraum von 162,5 Mio m³ auf.

Die wesentlichen Zuflüsse erhält die Granetalsperre durch die in Abbildung 2-4 gezeigten Überleitungen. Diese erfolgen aus der Radau über den Radau-Stollen (1), dessen Überleitungsmengen zusammen mit denen der Oker über den Oker-Grane-Stollen (2) die Talsperre erreichen und unterwegs eine Beileitung aus der Gose (3) aufnehmen. In weit geringerem Maße trägt die Innerstetalsperre über eine Pumpleitung (4) zur Füllung der Granetalsperre bei. Innerste-, Grane- und Okertalsperre bilden ein „Nordgruppe“ genanntes Talsperrenverbundsystem.

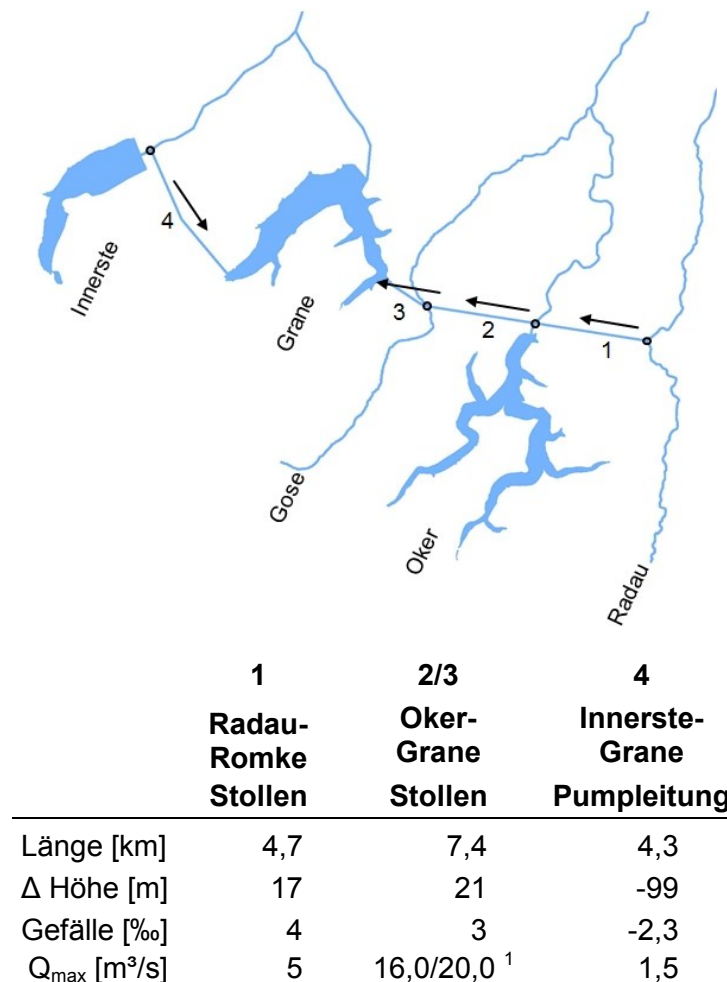


Abbildung 2-4: Überleitungen im Verbund der Nordgruppe, nicht maßstäblich.
¹Bis Gose/ab Gose.

Große Hochwasserschäden an Rhume und Leine durch die Hochwässer im März und Juni 1981 und ständig steigender Trinkwasserabsatz führten zur Wiederaufnahme von Überleitungen zu einem weiteren Ausbau des Talsperrensystems im Westharz. Die Abteilung Hydrologie und Wasserwirtschaft des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau wurde mit der Ermitt-

durch strukturiertes Ausprobieren so lange verändert, bis ein für optimal gehaltener Zustand erreicht war.

Auch die Erhöhung der Abgabe aus dem gewöhnlichen Hochwasserschutzraum war Gegenstand der Untersuchung, da die damals aktuellen Betriebsregeln für die Jahresreihe 1951-1981 an allen drei Speichern zu Entlastungsereignissen führten. Fließt Wasser über die Hochwasserentlastung ab, ist es für die Nutzung verloren; erhöht man die Abgabe aus dem Hochwasserschutzraum, kann das Wasser in der Regel für die Energieerzeugung genutzt werden. An Oker- und Granetalsperre wurden die Überläufe durch diese Maßnahme deutlich reduziert. Wegen des geringen Ausbaugrads der Innerstetalsperre war bei extremen Hochwässern wie 1981 auch bei erhöhten Abgaben aus dem Hochwasserschutzraum ein Anspringen der Hochwasserentlastung nicht zu vermeiden. Immerhin ließ sich die Anzahl der Überlauftage von 38 auf 18 in der Zeitreihe 1951-1981 verringern (Maniak und Seeger, 1988). Die im Nachgang dieser Untersuchungen aufgestellten Betriebspläne gelten bis heute. Eine Überarbeitung wird in den kommenden Jahren im Rahmen einer Erneuerung der Betriebsgenehmigung erfolgen.

Die Abbildung 2-6 zeigt den Betriebsplan der Sösetalsperre in vereinfachter Form. Gut zu erkennen ist der von Dezember bis Februar vergrößerte gewöhnliche Hochwasserschutzraum. Gleichen Speicherinhalten sind in den Wintermonaten größere Abgaben zugeordnet als in den übrigen Monaten. Dies führt zu geringeren Speicherinhalten im Winter. In diesen Monaten wird mit Hochwässern großer Fülle gerechnet.

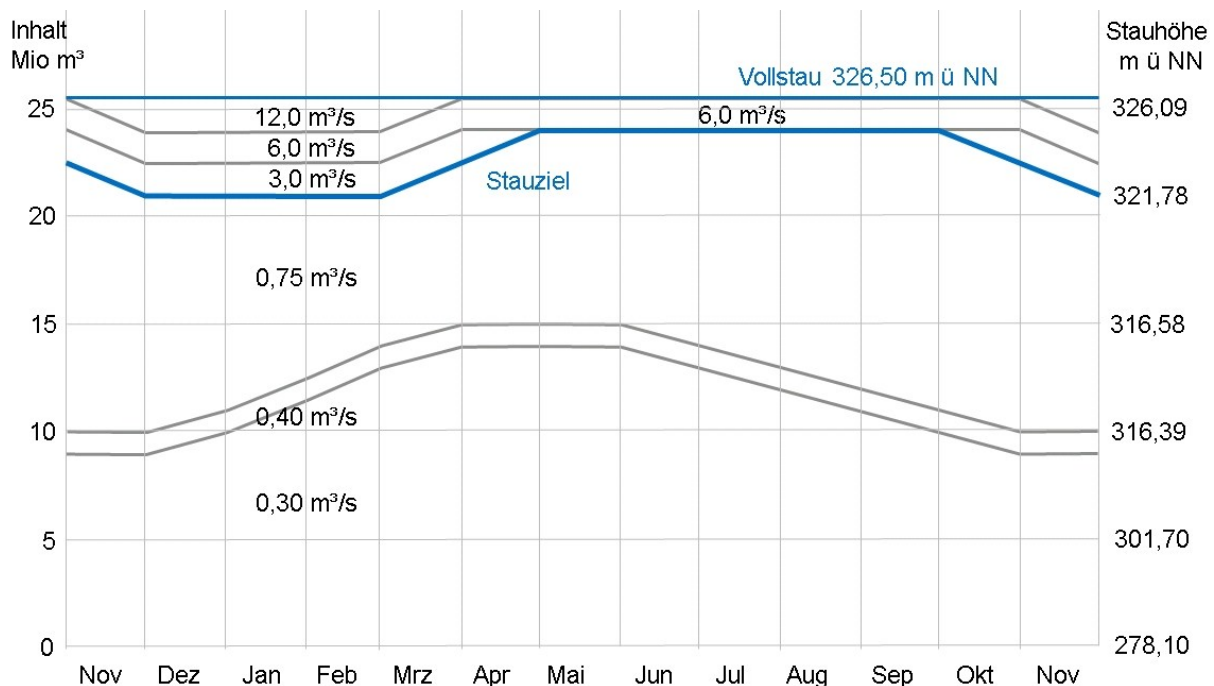


Abbildung 2-6: Betriebsplan der Sösetalsperre in vereinfachter Darstellung nach Unterlagen der Harzwasserwerke GmbH).

Der gewöhnliche Hochwasserschutzraum nach DIN 19700 (2004) Teil 11 wird von Stauziel und Vollstau begrenzt. Er dient dem Schutz der Unterlieger und wird häufig für das hundertjährige Ereignis HQ_{100} ausgelegt. Während der Vollstau das Anspringen der Hochwasserentlastung anzeigt und nicht einfach verändert werden kann, ist das Stauziel als Grenze zwi-

schen Betriebsraum und gewöhnlichem Hochwasserschutzraum durch den Betrieb zu beeinflussen und kann über das Jahr variabel sein.

2.2.2.3 Betrieb und Unterhalt durch die Harzwasserwerke GmbH

Am 22. November 1996 wurde die Harzwasserwerke GmbH beim Amtsgericht Hildesheim in das Handelsregister eingetragen. Vorausgegangen war ein eineinhalbjähriges Privatisierungsverfahren, das mit der Veräußerung der Harzwasserwerke für 220 Mio DM (112,48 Mio €) an ein von der Preussen Elektra geführtes Konsortium endete (FAZ, 1996). Seitdem verknüpft die Harzwasserwerke GmbH wasserwirtschaftliche Daseinsvorsorge mit dem betriebswirtschaftlichen Erfolgsanspruch einer Kapitalgesellschaft.

Die E.ON Avacon AG Helmstedt ist heute als Rechtsnachfolger der Preussen Elektra mit Anteilen von 13,51% der zweitgrößte der elf Gesellschafter der Harzwasserwerke GmbH. Größter Gesellschafter ist mit 25,1% die Harzwasser-Kommunale Wasserversorgung HKW Syke GmbH. Neun weitere Stadtwerke und Versorgungsunternehmen halten Gesellschaftsanteile zwischen 2,65 und 13,51% (HWW, 2011). Um dem Informationsinteresse der Gesellschafter und der Öffentlichkeit gerecht zu werden, veröffentlicht die Harzwasserwerke GmbH entsprechend den Regelungen für mittelgroße Kapitalgesellschaften jährliche Geschäftsberichte. Aus den Jahresabschlüssen der Geschäftsberichte 1997 bis 2010 kann die in Abbildung 2-7 gezeigte langfristige Entwicklung wichtiger Kennzahlen der Kapitalgesellschaft mit ihren heute rund 220 Beschäftigten zusammengestellt werden.

Der Trinkwasserumsatz war bis 2002 leicht rückläufig und stieg danach stetig an. Er ist die Haupteinnahmequelle der Harzwasserwerke GmbH. Der Erlös je m³ stieg nach den Angaben des jeweiligen Geschäftsberichts von 0,36 €/m³ im Jahr 1997 auf 0,46 €/m³ im Jahr 2010.

Für die Abschätzung des durch Trinkwasser erzielten Umsatzes einer Talsperre wird in Kapitel 10 der Mittelwert der Jahresreihe 2002-2008 von 0,44 €/m³ auf die dort angegebenen Produktionsmengen angewendet.

Der Umsatz durch Energieerzeugung ist deutlich geringer, konnte aber seit der Privatisierung ebenfalls erhöht werden. Der Erlös je kWh stieg von 0,065 auf 0,08 €/kWh im Zeitraum 1997-2010. Für die Abschätzung des durch Energieerzeugung erzielten Umsatzes einer Talsperre wird der Mittelwert der Jahresreihe 2002-2008 von 0,07 €/kWh auf die modellierte Produktion angewendet.

Zwar ist die GmbH mit ihren Kompetenzen im Vermessungs- Bau- und Laborwesen auch als Dienstleister tätig, der Löwenanteil an der Gesamtleistung des Unternehmens stammt jedoch aus Wasser- und Energieproduktion.

Konstant hohe Abschreibungen deuten auf die rege Investitionstätigkeit der Gesellschaft hin. Der Unterhalt des Talsperrensystems war zwischen 2002 und 2004 von der Sanierung der Innerstetalsperre geprägt. Eine Generalüberholung der Sösetalsperre erfolgte zwischen 2005 und 2009. Seitdem sind umfangreiche Sanierungsarbeiten an der Odertalsperre im Gange. Auch in die Energieerzeugung an den Talsperren und im Leitungsnetz wurde erheblich investiert.

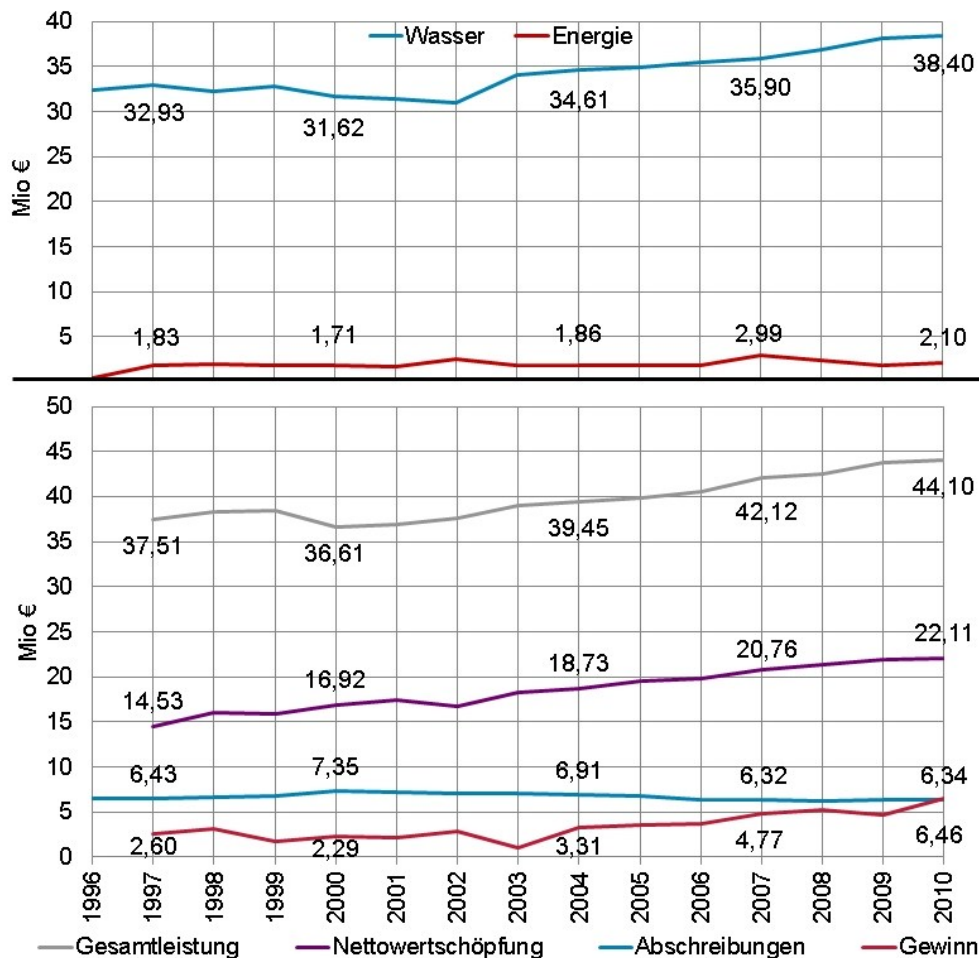


Abbildung 2-7: Langfristige Entwicklung wichtiger Kennzahlen der Harzwasserwerke GmbH.

Die Nettowertschöpfung des Unternehmens ergibt sich durch Verringerung der Gesamtleistung um Material- und sonstigen Aufwand sowie die Abschreibungen (Abbildung 2-8). Sie stieg von 39% im Jahr 1997 auf 50% im Jahr 2010 und liegt im Mittel der Jahresreihe 1997-2010 bei 46,5% der Gesamtleistung des Unternehmens.

Der Mittelwert der Nettowertschöpfung für die Jahresreihe 2002-2008 betrug 48%. Sie verteilt sich zum größeren Teil auf Löhne, Gehälter und Gewinnausschüttungen, zum kleineren Teil auf Rücklagen, Steuern und Zinszahlungen und bildet den Beitrag der Harzwasserwerke zum Gemeinwohl. Sie konnte im Zeitraum seit der Privatisierung durchschnittlich um 3% pro Jahr gesteigert werden und stieg damit deutlich stärker als die Inflation, deren Zunahme im gleichen Zeitraum durchschnittlich bei 1,4% pro Jahr lag.

Die Nettowertschöpfung unterscheidet sich von der Bruttowertschöpfung, die in Abschnitt 6.5 eingeführt wird, durch die Behandlung der Abschreibungen und der Steuern. Wie Abbildung 2-8 zeigt, enthält die Nettowertschöpfung Steuern, aber keine Abschreibungen, die Bruttowertschöpfung hingegen Abschreibungen, aber keine Steuern (AK VGR, 2011). Da Abschreibungen und Steuern in den Geschäftsberichten des Talsperrenbetreibers aufgeführt werden, kann aus diesen Angaben die Bruttowertschöpfung geschätzt werden. Sie lag im Mittel der Jahresreihe 2002-2008 bei 58,8%. Für die Schätzung des Beitrags einer Talsperre zum Gemeinwohl wird in Kapitel 10 dieser Prozentsatz auf die modellierten Umsätze Tal-

sperre angewendet. Er stellt die beste Vergleichbarkeit mit den volkswirtschaftlichen Daten her.

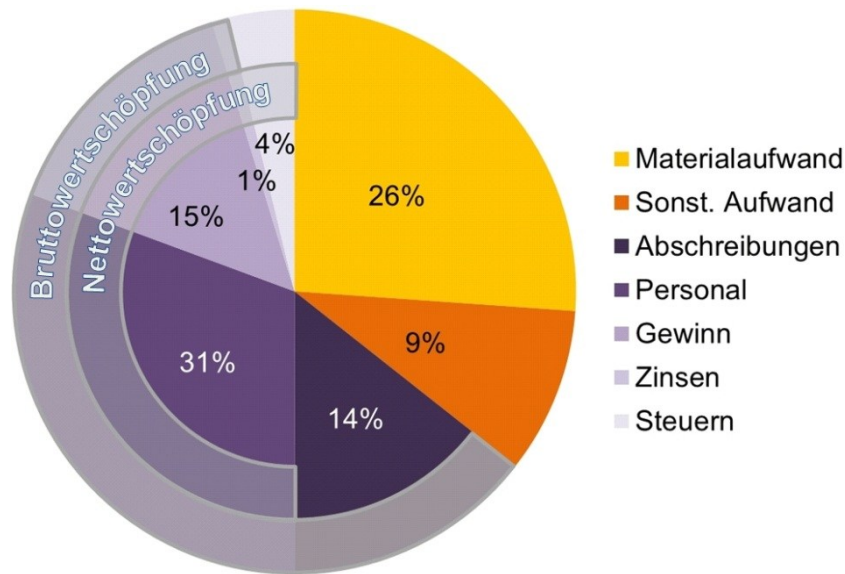


Abbildung 2-8: Relative Verteilung der Gesamtleistung der Harzwasserwerke im Jahr 2010 (HWW 2011, verändert).

Nicht allein günstige Rahmenbedingungen führten zu einer Zunahme der Nettowertschöpfung, sondern auch das Unternehmensmanagement, wie der Vergleich von Abbildung 2-7 mit der in Abbildung 2-9 dargestellten Trinkwasserproduktion zeigt.

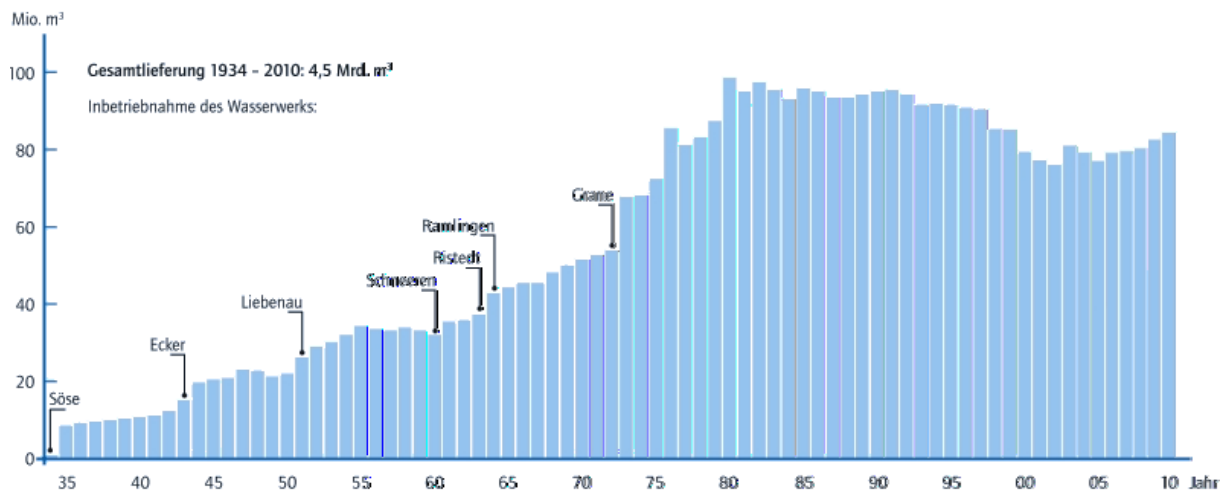


Abbildung 2-9: Trinkwasserproduktion der Harzwasserwerke seit 1935 (HWW, 2011).

Neben den Trinkwasserwerken im Harz enthält diese Darstellung auch die Grundwasserwerke außerhalb des Harzes. Bis in die frühen Achtzigerjahre war der Trinkwasserabsatz allein durch die Produktionskapazität limitiert. Das Allzeithoch wurde mit rund 98 Mio m³ im Jahr 1980 erreicht. Danach sank der Trinkwasserabsatz bis zum Jahr 1997 leicht. Zwischen 1997 und 2002, also in den ersten fünf Jahren der Kapitalgesellschaft, ging die Absatzmenge vergleichsweise stark zurück. Abbildung 2-7 zeigt, dass ein Umsatzrückgang durch Preissteigerungen nicht vollständig aufgefangen wurde. Ein gutes Kostenmanagement führte in dieser Zeit sinkender Umsätze dennoch zu einer steigenden Nettowertschöpfung.

Seit 2003 gelang es der Harzwasserwerke GmbH, die Rückgänge im Privatkundengeschäft durch Zugewinne im Geschäftskundengeschäft mehr als auszugleichen. Der Trinkwasserabsatz stieg, das strategische Unternehmensziel ist ein Absatz von 95 Mio m³ jährlich (HWW, 2011).

Anders als der Trinkwasserabsatz ist der Energieabsatz bis heute nicht durch die Nachfrage limitiert. Die Produktion regenerativer Energie ist daher ein wichtiges Betätigungsfeld für das Unternehmen.

Die Energieproduktion der Talsperren ist stark durch die hydrologischen Rahmenbedingungen geprägt. Das Allzeithoch der gezeigten Jahresreihe fällt in das nasse Jahr 2007, das zusätzlich durch ein Hochwasser im September gekennzeichnet war. Auch in Gefällestrecken des Leitungssystems gewinnen die Harzwasserwerke Energie. Dieser Sockelbetrag ist unabhängig von Schwankungen im hydrologischen Regime.

Von den jährlich rund 35,4 Mio kWh (HWW, 2011) stammt der größere Teil aus den Kraftwerken an den Talsperren, wie Abbildung 2-10 zu entnehmen ist. Die durchschnittliche jährliche Energieproduktion von 35,4 Mio kWh entsteht zu 69% (24,3 Mio kWh) an den Talsperren und zu 31% (11,1 Mio kWh) an Übergabestationen oder Hochbehältern des Leitungssystems.

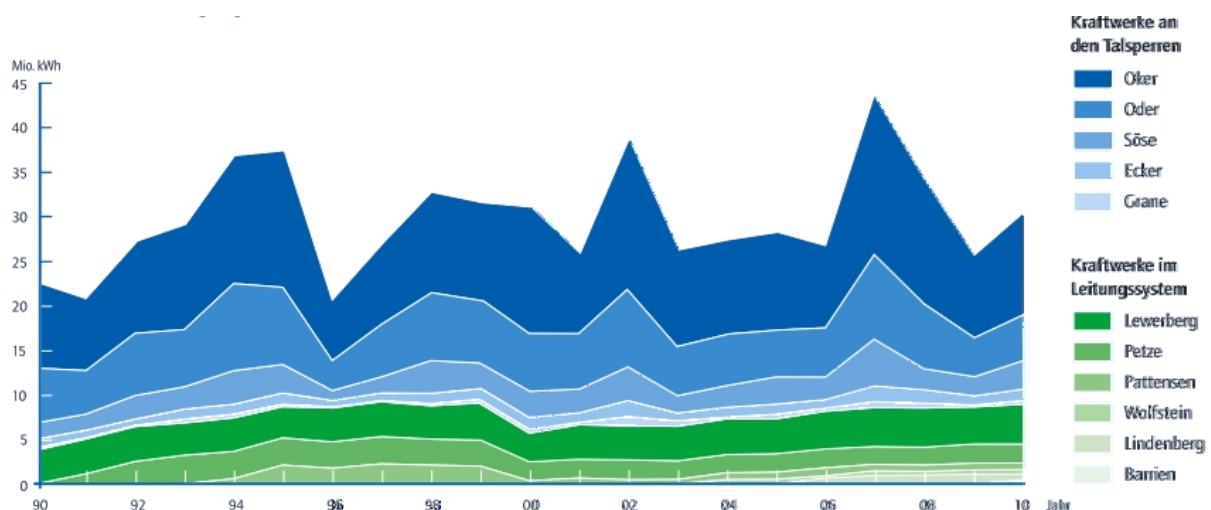


Abbildung 2-10: Energieproduktion der Harzwasserwerke seit 1990, mittlere jährliche Energieproduktion 35,4 Mio kWh (HWW, 2011).

Tabelle 2-4 gibt einen Überblick über das heute bestehende Energieerzeugungssystem. Leistungsdaten zu den einzelnen Turbinen des Systems sind in HWW (2008) veröffentlicht. Das größte Kraftwerk der Harzwasserwerke GmbH befindet sich rund zwei Kilometer unterhalb der Okertalsperre bei Romkerhall, am Einlauf zum Oker-Grane-Stollen (Abbildung 7-19). Es verfügt über eine Francis-Turbine mit einer Leistung von 4 410 kW, die täglich in den Morgenstunden läuft, um Spitzenstrom zu liefern.

Tabelle 2-4: Energieerzeugung an den Talsperren und im Leitungsnetz der Harzwasserwerke GmbH (HWW 2008, verändert).

Name	Baujahr / Umbau	Turbinen Anzahl	Leistung [kW]	Erzeugung pro Jahr [kWh/a]
Söse	1934 / 1989	3	1.600	2.900.000
Oder	1934 / 1989	2	5.045	7.100.000
Ecker	1943 / 1997	2	600	1.400.000
Oker	1956	1	4.410	12.500.000
Grane	1972	1	180	400.000
Summe Talsperren		9	11.835	24.300.000
Lewerberg	1980 / 1993	2	700	3.900.000
Petze	1991 / 1992	2	415	2.500.000
Pattensen	1994	3	130	800.000
Weende	2001	1	200	800.000
Wolfstein	2003	2	104	650.000
Friedrichshöhe	2004	1	200	1.150.000
Lindenberg	2006	2	222	1.300.000
Summe Leitungsnetz		13	1.971	11.100.000
Total		22	13.806	35.400.000

Die komplexeste Anlage zur Energieerzeugung befindet sich an der Sösetalsperre (Abbildung 2-11). „Das für den Söse-Unterlauf und für das Wasserwerk bestimmte Wasser wird aus der Talsperre zunächst über die ständig laufende, kleinere Francis-Turbine (300 kW) geleitet. Bei Hochwasser wird zusätzlich zeitweise die größere Francis-Turbine (1 280 kW) in Betrieb genommen. Sie läuft insbesondere dann, wenn im öffentlichen Netz der größte Strombedarf vorliegt. Unterhalb des Sösestaudamms befindet sich ein Ausgleichsbecken, in dem das von den Turbinen abfließende Wasser gespeichert und gleichmäßig verteilt über 24 Stunden an den Unterlauf abgegeben wird. Seit 1989 wird auch das kleine Wassergefälle dieses Ausgleichsbeckens genutzt, um eine Kaplan-Turbine (22 kW) anzutreiben“ (HWW, 2008).

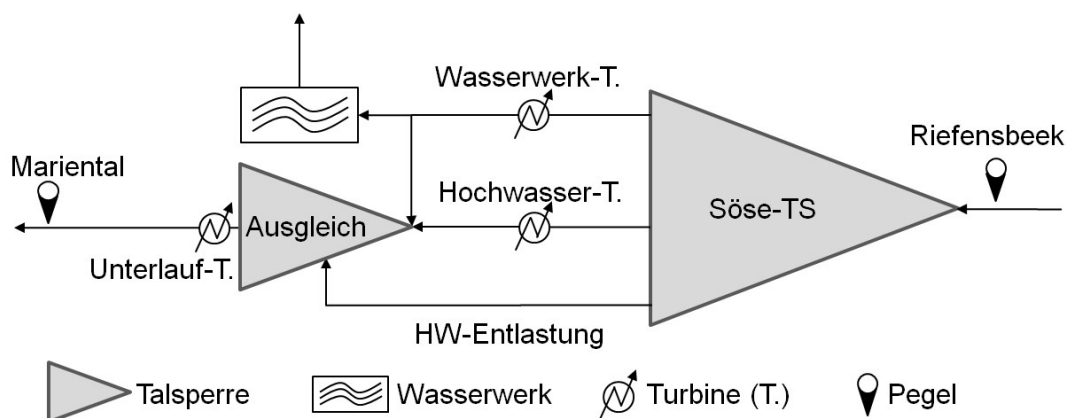


Abbildung 2-11: Schematische Darstellung der Betriebseinrichtungen an der Sösetalsperre.

2.3 Diskussion

Der lange Weg von den ersten Planungen bis zur Realisierung zeigt, dass ausgedehnte Planungszeiträume schon immer ein Charakteristikum großer Projekte waren. Typisch für Hochwasserschutzmaßnahmen erscheint, dass rationale Gründe und Erfahrungswerte für eine Realisierung nicht ausreichten, sondern erst ein Großschadenereignis das für die politische Durchsetzung erforderlichen Moment erzeugte.

Seit über 80 Jahren werden Talsperren im Westharz ihrer multifunktionalen Aufgabenstellung gerecht. Drei kritische Erfolgsfaktoren scheinen besonders wichtig:

- Voraussetzung für die Planung war ein angemessener rechtlicher Rahmen, erst für die Bildung großer gewerblicher Versorgungsgenossenschaften, später zur Erfüllung von Zwecken der öffentlichen Daseinsvorsorge.
- Nach anfänglich sehr kleinteiliger Planung setzte sich mit einem mittleren Ausbaugrad etwas über 0,6 eine eher große Wahl des Stauraums durch.
- Da die Stauräume des Westharzes im internationalen Vergleich dennoch klein sind, wurde mit der Trinkwasserversorgung als Schwerpunkt diejenige Nutzung gewählt, mit der sich ein wirtschaftlicher Betrieb am ehesten darstellen lässt.

3 Beobachtung und Projektion des Klimawandels

Dieses Kapitel führt über den beobachteten Klimawandel und seine globale Modellierung zu den regionalen Klimamodellen, die in dieser Arbeit Anwendung finden und stellt damit die Modellkette des Projekts KLIFWA vor. Als Grundlage der Klimaprojektionen werden die Emissionsszenarien eingeführt sowie die Bevölkerungsprognosen, auf denen sie aufbauen. Daran schließt sich die Entwicklung regionaler Bevölkerungsprognosen an, die für die Abschätzung des zukünftigen Hochwasserrisikos und damit für die zusammenfassenden Bewertung der Ergebnisse in Kapitel 10 wichtig sind.

3.1 Beobachteter Klimawandel

Es ist unumstritten, dass sich das Klima der Erde in den letzten Dekaden gewandelt hat, wie zahlreiche Aufzeichnungen meteorologischer und hydrologischer Dienste weltweit zeigen (IPCC, 2007). Seit Mitte des 19. Jahrhunderts ist die Erdoberfläche, vorwiegend infolge menschlicher Aktivitäten, um fast ein Grad wärmer geworden. Von besonderem Interesse ist hierbei die Frage, ob und wie sich extreme Ereignisse wie Starkniederschläge verändert haben und gegebenenfalls verändern werden und wie sich dies auf die Bewirtschaftung von Speichern auswirkt. Klimamodelle sind die einzigen theoretischen Werkzeuge, mit denen sich solche Veränderungen durch Erforschung der komplexen Prozesse des Klimasystems qualitativ und quantitativ ausdrücken lassen. Die Untersuchung des menschlichen Einflusses auf das Klima mittels Klimamodellen ist Ziel des Weltklimarats (Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC), der durch das United Nations Environment Program UNEP und die World Meteorological Organization 1988 ins Leben gerufen wurde (Roeckner et al., 2006). Seit 1990 veröffentlicht der Weltklimarat Sachstandsberichte über den Klimawandel und seine Erforschung. Der folgende Abschnitt zeigt in der Übersetzung des Autors die Argumentation, der der Weltklimarat in seinem vierten Sachstandsbericht aus dem Jahr 2007 folgt, um die Verantwortung der Menschen für die gegenwärtig beobachtete Klimaerwärmung zu zeigen:

In der Wissenschaft besteht weitgehend Einigkeit darüber, dass die Änderung der Energiebilanz der Erde die wesentliche Ursache für den Klimawandel ist (IPCC, 2007). Die Energiebilanz der Erde wird jedoch durch zahlreiche Prozesse beeinflusst, die sich in ihrem Zusammenspiel gegenseitig verstärken oder abschwächen können:

1. Schwankungen der Erdbahn bzw. der Erdachsenneigung;
2. Sonnenemissionsintensität, Sonnenfleckenzyklus;
3. Änderung der planetarischen Albedo, also der Reflektionseigenschaften der Landoberflächen aufgrund Eismassen- und Landnutzungsänderung;
4. Zusammensetzung der Atmosphäre, also Absorption und Reflexion der Wärmestrahlung durch Wasserdampf, Aerosole und Treibhausgase;
5. Tektonische Änderungen, also Plattentektonik und Vulkanismus, sowie
6. Änderung der Zirkulationsmuster in den Ozeanen.

Die Änderung, die einer dieser Faktoren in der Energiebilanz des Erd-Atmosphäre-Systems verursacht, wird als Strahlungsantrieb in Watt pro Quadratmeter (Radiative Forcing, W/m^2) ausgedrückt.

Dabei zeigt der Betrag die Wichtigkeit des Faktors als möglicher Klimaänderungsmechanismus an, das Vorzeichen bestimmt die Richtung der Wirkung. Positive Strahlungsantriebe fördern die Erwärmung, negative fördern eine Abkühlung (IPCC, 2007).

Kohlendioxid (CO_2) ist das wichtigste von Menschen emittierte, also anthropogene Treibhausgas. Die globale atmosphärische CO_2 -Konzentration ist von einem vorindustriellen Wert von 280 ppm (Teile pro Million, 0,28 ‰) auf 379 ppm (0,379 ‰) im Jahr 2005 angestiegen. Dies übersteigt bei weitem den natürlichen Bereich der letzten 650 000 Jahre von 180 bis 300 ppm, welcher aus Eiskernuntersuchungen ermittelt wurde. Die Hauptquelle der erhöhten atmosphärischen Konzentration stammt aus dem Verbrauch fossiler Energieträger, wobei Landnutzungsänderungen einen weiteren signifikanten, jedoch kleineren Beitrag leisten (IPCC, 2007).

Die globale atmosphärische Methankonzentration stieg von einem vorindustriellen Wert von 715 ppb (Teile pro Milliarde) auf 1774 ppb in 2005 und liegt damit ebenfalls weit über dem natürlichen Bereich von 320 bis 790 ppb der letzten 650 000 Jahre. Es ist sehr wahrscheinlich ($P > 90\%^2$), dass dieser Anstieg hauptsächlich aus der Landwirtschaft und dem Verbrauch fossiler Energieträger stammt, jedoch sind andere Quellen nicht gut bestimmt. Auch die globale atmosphärische Stickoxidkonzentration ist im genannten Zeitraum von 270 auf 319 ppb angestiegen, ebenso vorwiegend aus landwirtschaftlichen Quellen (IPCC, 2007).

Abbildung 3-1 zeigt die aus Eiskernuntersuchungen ermittelte atmosphärische Konzentration von Kohlendioxid, Methan und Stickoxid über die letzten 10 000 Jahre (große Abbildungen) und seit 1750 (Ausschnittsvergrößerungen). Symbole in unterschiedlichen Farben stehen für unterschiedliche Untersuchungen, rote Linien stammen aus atmosphärischen Messungen. Die linke Achse gibt die Konzentration an, die rechte Achse zeigt den Strahlungsantrieb. Mittlerweile besteht unter den Experten ein sehr großes Vertrauen ($P > 90\%$), dass im globalen Durchschnitt menschliche Aktivitäten seit 1750 mit einem Strahlungsantrieb von $+1,6 \text{ W/m}^2$ einen insgesamt erwärmenden Einfluss auf das Klima hatten.

Anthropogene Beiträge zum Ausstoß von Aerosolen (hauptsächlich Sulfat, organischer Kohlenstoff, reiner Kohlenstoff, Nitrat und Staub) erzeugten insgesamt einen kühlenden Effekt mit einem direkten Strahlungsantrieb von $-0,5 \text{ W/m}^2$ und einer indirekten Wolken-Albedo von $-0,7 \text{ W/m}^2$. Diese Antriebe bleiben die dominante Unsicherheitsquelle im Strahlungsantrieb. Weiterhin beeinflussen Aerosole die Bewölkung und den Niederschlag durch ihre Eigenschaft als Kondensationskeime.

Direkte Beobachtungen des rezenten Klimawandels zeigen einen Anstieg der mittleren oberflächennahen Temperatur von $0,74^\circ\text{C}$ zwischen 1906 und 2005. Der Anstieg des atmosphärischen Wasserdampfgehaltes entspricht dem zusätzlichen Wasserdampf, den wärmere Luft aufnehmen kann. Seit 1961 vorliegende Beobachtungen zeigen, dass die Durchschnittstemperatur der Ozeane bis in mindestens 3 000 m Tiefe zugenommen hat. Damit haben die

² Wahrscheinlichkeit gemäß „IPCC Guidance Notes for Lead Authors ... on Addressing Uncertainties“

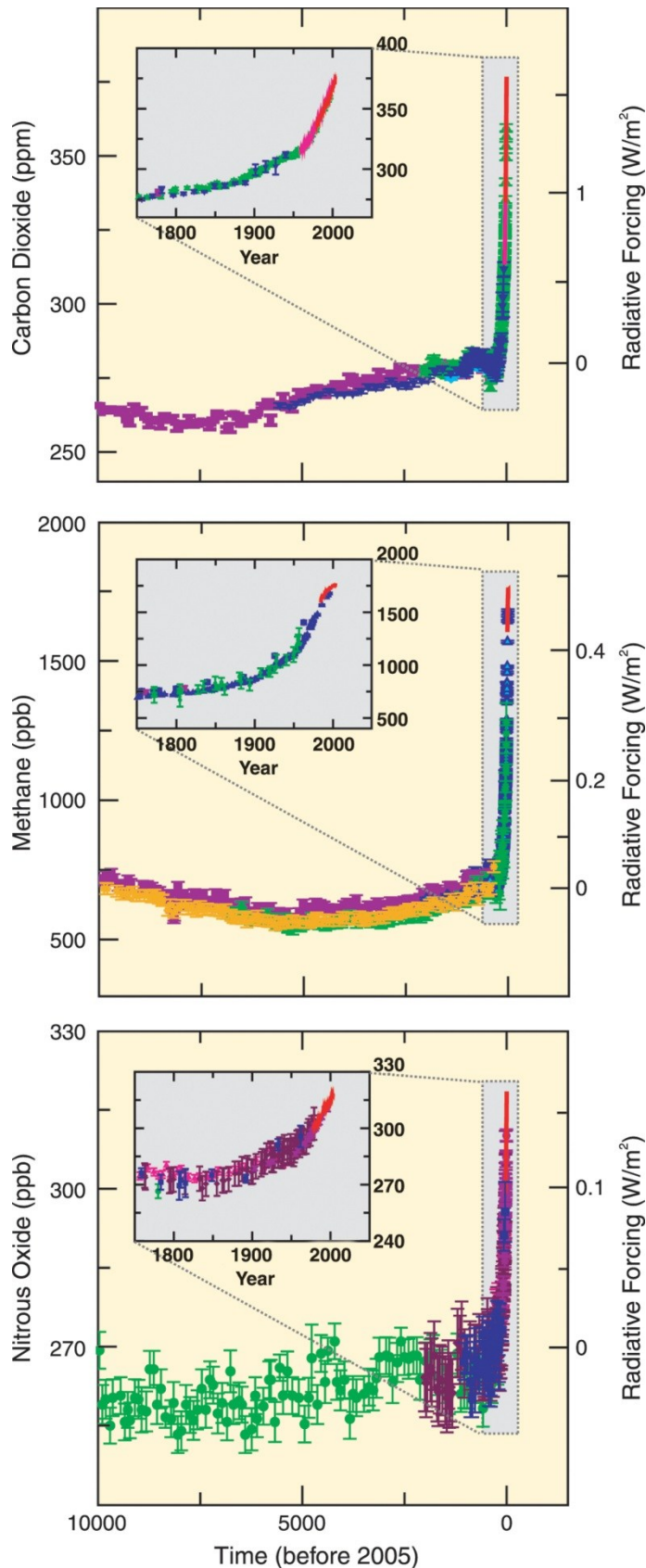


Abbildung 3-1: Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre (IPCC, 2007).

Ozeane mehr als 80% der dem Klimasystem zugeführten Wärme aufgenommen. Gletscher und Schneedecken haben im Durchschnitt sowohl in der südlichen als auch in der nördlichen Hemisphäre abgenommen.

Neue Messdaten zeigen, dass Verluste der Eisschilde in Grönland und der Antarktis sehr wahrscheinlich ($P > 90\%$) zum Meeresspiegelanstieg beigetragen haben.

Auch in den Niederschlagsmengen konnten zwischen 1900 und 2005 langfristige Trends beobachtet werden. Deutliche Niederschlagszunahmen wurden in östlichen Teilen von Nord- und Südamerika, Nordeuropa sowie Nord- und Zentralasien beobachtet. Dem stehen Abnahmen in der Sahelzone, im Mittelmeerraum, Südamerika und Teilen Südsiens gegenüber.

Paleoklimatische Befunde stützen die Interpretation, dass die Erwärmung des letzten halben Jahrhunderts im Vergleich zu den vergangenen 1300 Jahren ungewöhnlich ist. Vor 125 000 Jahren, im letzten Interglazial, waren die Polarregionen zuletzt deutlich wärmer als gegenwärtig. Die Verminderung des polaren Eisvolumens führte zu einem Meeresspiegelanstieg von vier bis sechs Metern. (IPCC, 2007).

Der größte Anteil des beobachteten Anstiegs der mittleren globalen Temperaturen seit der Mittel des 20. Jahrhunderts ist sehr wahrscheinlich ($P > 90\%$) auf den Anstieg anthropogener Treibhausgasemissionen zu-

rückzuführen. Es ist wahrscheinlich ($P > 66\%$), dass der Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen allein eine stärkere Erwärmung als beobachtet erzeugt hätte, da Vulkanausbrüche und Aerosole menschlichen Ursprungs einen Teil dieser Erwärmung ausgeglichen haben.

Die beobachtete weiträumige Erwärmung der Atmosphäre und der Ozeane sowie der Verlust an Eismasse erlauben folgende Schlussfolgerungen (IPCC, 2007):

- Es ist extrem unwahrscheinlich ($P < 1\%$), dass der globale Klimawandel der letzten 50 Jahre ohne externen Strahlungsantrieb erklärt werden kann.
- Es ist sehr unwahrscheinlich ($P < 10\%$), dass der Klimawandel zumindest innerhalb der letzten sieben Jahrhunderte vor 1950 auf Variabilität zurückgeht, die allein aus dem Klimasystem stammt.
- Es ist sehr wahrscheinlich ($P > 90\%$), dass der globale Klimawandel nicht allein auf natürliche Ursachen zurückgeht.

Es verbleiben jedoch Schwierigkeiten bei der zuverlässigen Simulation und Zuordnung beobachteter Temperaturänderungen auf kleineren Skalen. Auf diesen ist die natürliche Klimavariabilität vergleichsweise größer, was die Abgrenzung von Veränderungen, die aus externen Strahlungsantrieben resultieren, erschwert. Unsicherheiten in lokalen Antrieben sowie Rückkopplungen machen es weiterhin schwierig, den Beitrag des Treibhausgasanstiegs auf kleinskalige Temperaturveränderungen abzuschätzen (IPCC, 2007).

3.2 Projektionen des Klimawandels

Seit dem 3. Sachstandsbericht des Weltklimarats hat die Forschung wesentliche Fortschritte beim Verständnis der aktuellen Klimaänderungen erzielt: Die räumliche und zeitliche Datengrundlage wurde erweitert, die Datenanalysen verbessert, die Erde geografisch breiter erfasst und bisherige Unsicherheitsfaktoren besser verstanden und hinsichtlich ihrer Klimawirksamkeit eingegrenzt. Insbesondere wurden auch mehr und bessere Modelle verwendet. Der 4. Sachstandsbericht bestätigt, bekräftigt oder präzisiert zentrale Aussagen des 3. Sachstandsberichts (Jacob et al., 2008). An der Irreversibilität des Klimawandels, in dessen Folge Temperaturerhöhungen zu Veränderungen im Niederschlagsgeschehen führen werden, lässt der Bericht keinen Zweifel. Auf der Basis umfangreicher Beobachtungen des letzten Jahrhunderts sind danach zahlreiche Langzeitveränderungen des Klimas festzustellen. Die für die Wasserwirtschaft wesentlichen, aus globalen und regionalen Klimamodellrechnungen projizierten Auswirkungen des Klimawandels werden wie folgt zusammengefasst (Stempowski et al., 2008):

- „In den nächsten 100 Jahren wird die globale Erwärmung 1,1 bis 6,4°C (sic!) betragen. Diese Entwicklung zeigt sich besonders ausgeprägt über Land und in den nördlichen Breiten.
- Es wird zu einer Abnahme von Frosttagen und einer Zunahme von heißen Tagen kommen und somit zu einem Rückgang von Schnee- und Eisbedeckung.
- Lokal sehr begrenzte Extremniederschläge werden zunehmen.
- Zunehmenden monatlichen Niederschlagssummen im Winter stehen abnehmende monatliche Niederschlagssummen im Sommer gegenüber.

- In Folge erhöhter Grundwasserneubildung im Winter deuten sich steigende Grundwasserstände an“ .

3.3 Emissionsszenarien als Grundlage für die Projektion des Klimawandels

Das Klimasystem ist besonders wegen der verzögerten Reaktion der Ozeane träge. Auch wenn alle Strahlungsantriebe auf dem Niveau von 2000 konstant gehalten würden, würde die Erwärmung mit einer Rate von $0,1^{\circ}\text{C}$ per Dekade für die nächsten zwei Dekaden anhalten. Dennoch hat die langfristige Entwicklung anthropogener Treibhausgasemissionen einen wichtigen Einfluss auf den Klimawandel. Um eine Bandbreite zukünftiger Entwicklungen der Klimamodellierung verfügbar zu machen, beauftragte der Weltklimarat die Entwicklung eines Katalogs von Emissionsszenarien für den Zeitraum 2001 bis 2100 (IPCC, 2000).

Der Special Report on Emissions Scenarios (IPCC, 2000) präsentiert eine Reihe von Szenarios, die den gegenwärtigen Stand der Szenarioliteratur bezüglich möglicher Antriebskräfte und Emissionen repräsentieren. Nur Katastrophenszenarios wurden ausgeschlossen. Der Bericht präferiert keines der vorgestellten Szenarios. Es werden ihnen keine Eintrittswahrscheinlichkeiten zugeordnet. Jedes Szenario basiert auf unterschiedlichen Annahmen über den demografischen, wirtschaftlichen und technologischen Wandel, manche werden diese positiv, andere hingegen negativ einschätzen. Diese drei Hauptantriebskräfte zukünftiger Treibhausgasemissionen wurden in vier unterschiedliche Kombinationen in den Szenariofamilien A1, A2, B1 und B2 organisiert.

Szenariofamilie A1

Die Szenariofamilie A1 beschreibt eine künftige Welt mit sehr raschem wirtschaftlichem Wachstum, einer Weltbevölkerung, die Mitte des 21. Jahrhunderts zahlenmäßig ihren Höhepunkt erreicht und danach abnimmt, und der schnellen Einführung von neuen und effizienteren Technologien. Die wichtigsten Grundannahmen sind eine Annäherung der Regionen, der weltweite Austausch von Wissen und zunehmende kulturelle und soziale Interaktion, die mit einer erheblichen Verminderung der regionalen Unterschiede im Pro-Kopf-Einkommen einhergeht.

Die drei Mitglieder der Szenariofamilie A1 unterscheiden sich durch ihren jeweiligen technologischen Schwerpunkt: intensive Nutzung fossiler Brennstoffe (A1FI), nicht-fossiler Energiequellen (A1T). Die ausgeglichene Nutzung über alle Energieträger hinweg ist der technologische Schwerpunkt des Szenarios A1B. Auf diesem basieren alle in der vorliegenden Arbeit verwendeten Klimaprojektionen. Das Szenario A1B führt zu einem Temperaturanstieg um $2,8^{\circ}\text{C}$ ($1,7 - 4,4$) im Zeitraum von 2000 bis 2100 (IPCC, 2007).

Szenariofamilie B1

Die Szenariofamilie B1 beschreibt eine konvergierende Welt mit der gleichen demografischen Entwicklung wie im Szenario A1, aber mit raschen Veränderungen in den wirtschaftlichen Strukturen hin zu einer Dienstleistungs- und Informationswirtschaft mit deutlich geringerer Materialintensität und Einführung von emissionsarmen und ressourcenschonenden Technologien. Die Betonung liegt auf globalen Lösungen in Richtung wirtschaftlicher, sozialer und ökologischer Nachhaltigkeit und größerer Gerechtigkeit, jedoch ohne zusätzliche Kli-

maschutzinitiativen (IPCC, 2000). Das Szenario B1 führt zu einem Temperaturanstieg von $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($1,1 - 2,9$) im Zeitraum 2000 – 2100 (IPCC, 2007).

Szenariofamilie A2

Die Szenariofamilie A2 beschreibt eine sehr heterogene Welt, basierend auf Autarkie und Bewahrung lokaler Identitäten. Die Geburtenraten der verschiedenen Regionen nähern sich nur langsam an, was zu einem kontinuierlichen Wachstum der Weltbevölkerung führt. Wirtschaftliches Wachstum ist vor allem regional orientiert, Pro-Kopf-Wachstum und technologischer Wandel vollziehen sich fragmentierter und langsamer als in den anderen Szenariofamilien (IPCC, 2000). Das Szenario A2 führt zu einem Temperaturanstieg von $3,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($2,0 - 5,4$) im Zeitraum 2000 – 2100 (IPCC, 2007).

Szenariofamilie B2

Die Szenariofamilie B2 betont lokale Lösungen für ökonomische, soziale und natürliche Nachhaltigkeit. Ein kontinuierliches Bevölkerungswachstum findet statt, allerdings etwas schwächer als in A2. Eine mittlere ökonomische Entwicklung geht mit einem technologischen Wandel einher, der langsamer und lokal unterschiedlicher als in B1 und A1 ist. Einerseits konzentriert sich die Szenariofamilie auf Umweltschutz und soziale Gleichheit, andererseits auf die lokale und regionale Ebene (IPCC, 2000). Das Szenario B2 führt zu einem Temperaturanstieg von $2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($1,4 - 3,8$) im Zeitraum 2000 – 2100 (IPCC, 2007).

Abbildung 3-2 zeigt links die zeitliche Entwicklung der CO_2 -Konzentrationen für die Szenarios A2, A1B und B1. Rechts ist die entsprechende Entwicklung der global und jährlich gemittelten Temperatur in Erdbodennähe gegenüber dem Mittelwert der Jahre 1961-1990 dargestellt. Im Zeitraum 1860-2000 sind die natürlichen Strahlungsantriebe (wie z. B. Vulkanismus, Änderungen der Sonneneinstrahlung) nicht berücksichtigt. Dargestellt ist das Ensemblemittel aus 3 Realisierungen von ECHAM5/MPI-OM (Jacob et al., 2008).

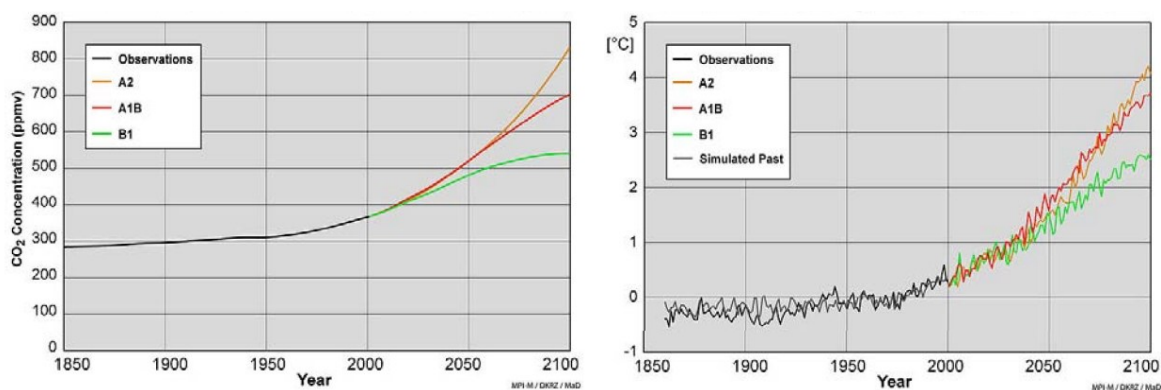


Abbildung 3-2: Zeitliche Entwicklung der CO_2 -Konzentrationen und der Temperatur gemäß Beobachtungen (1850-2000) sowie in den IPCC Szenarien A2, A1B und B1 (Jacob et al., 2008).

Gut zu erkennen ist, dass das Szenario A1B sowohl in der Entwicklung der Kohlendioxidkonzentration (links) als auch in der Entwicklung des Temperaturanstiegs (rechts) einem mittleren Szenario gut gerecht wird.

3.4 Bevölkerungsprognosen im Rahmen der Emissionsszenarien

3.4.1 Globale Bevölkerungsprognosen

Im vorigen Abschnitt wurde erörtert, dass der demografische Wandel zu den wichtigsten Hauptantriebskräften zukünftiger klimatischer Entwicklungen gehört. Der demografische Wandel ist dabei räumlich stark unterschiedlich ausgeprägt. Abnahmen in der entwickelten Welt werden durch Zunahmen in Entwicklungsländern überkompensiert. Nach einer kurzen Erläuterung des klassischen Verfahrens der Bevölkerungsprognose werden im Folgenden die Quellen vorgestellt, auf denen die SRES-Szenarien beruhen.

Die am weitesten verbreitete Methode zur Abschätzung der Bevölkerungsentwicklung ist das Kohorten-Komponenten-Verfahren (Meise und Volwachs, 1980). Hierbei wird die Bevölkerung in sogenannte weibliche und männliche Kohorten nach Altersklassen gegliedert. Die Gliederung wird nach Jahren vorgenommen, wobei die Kohortengröße in der Regel von einem bis zu fünf Jahren reicht. Bei der Fortschreibung von Kohorte zu Kohorte werden diese jeweils mit Komponenten multipliziert, die die wesentlichen Einflussgrößen auf die Bevölkerungsentwicklung abbilden:

Die Altersstruktur, also das Verhältnis von Kindern, Erwerbstätigen und Rentnern, ist die Ausgangsgröße der Bevölkerungsfortschreibung. Ähnlich wichtig ist der Anteil an Frauen pro 1000 Männer, da dieser die Geburtenhäufigkeit beeinflusst. Die Fertilität als Anzahl der Geburten pro Frau bestimmt die Bevölkerungsentwicklung maßgeblich mit. Bei einer in Deutschland typischen Geburtenrate von 1,3 Kindern je Frau ergibt sich eine Geburtenwahrscheinlichkeit je Frau im gebärfähigen Alter und Jahr von 0,03. Die Säuglingssterblichkeit ist der Anteil der im ersten Lebensjahr verstorbenen an den das erste Lebensjahr überlebenden Säuglingen. Die Mortalität oder Überlebenswahrscheinlichkeit geht als alters- und geschlechtsspezifische Sterbeziffer in die Berechnung ein. Die Migrationsbereitschaft ist die letzte wesentliche Einflussgröße auf die Bevölkerungsentwicklung. Die Nahwanderung beschreibt hierbei die familienbedingte Wohnortwahl: Die Personengruppen der 30- bis 40-jährigen ziehen häufig aus den Stadtzentren in ruhigere Wohngebiete am Stadtrand oder auf dem Land, da diese für Familien geeigneter erscheinen. Die Fernwanderung ist hingegen überwiegend durch berufliche Belange bedingt.

Den Emissionsszenarios des Weltklimarates liegen drei Bevölkerungsprognosen aus unterschiedlichen Schätzungen der globalen Bevölkerungsentwicklung zu Grunde:

- Die Szenariofamilien A1 und B1 basieren auf der niedrigen Projektion des „International Institute for Applied Systems Analysis“ IIASA (Lutz et al., 1996). In dieser Prognose steigt die Weltbevölkerung bis 2050 auf 8,7 Milliarden, um danach bis 2100 auf 7 Milliarden zu sinken.
- Die Szenariofamilie B2 basiert auf der mittleren Langfristprognose der Vereinten Nationen von 1998, die für 2100 eine Weltbevölkerung von 10,4 Milliarden vorhersagt (United Nations, 1999).
- Die Szenariofamilie A2 basiert auf der oberen Langfristprognose des IIASA, das von einer Weltbevölkerung von 15 Milliarden im Jahr 2100 ausgeht (Lutz et al., 1996).

Lutz et al. (1996) unterteilen die Welt in 13 Regionen, für die die Bevölkerung gesondert fortgeschrieben wird, um die unterschiedlichen Lebensrealitäten besser abzubilden. Für die Großregion Westeuropa entwickelten die Autoren unterschiedliche Szenarios der Faktoren Fertilität, Mortalität und Migrationsbereitschaft. Für die Fertilität wählten sie Werte zwischen 1,3 und 2,1 Geburten je Frau. Die mittlere Rate von 1,7 entspricht in etwa der Fertilität im Jahr 1995. Bei der Mortalität entschieden sie sich für rückläufige Werte, indem sie eine Zunahme der Lebenserwartung von eins, zwei und drei Jahren pro Dekade annahmen. Für die Migration wurde für Westeuropa ein Überschuss von jährlich einer Million Personen angenommen. Die Abbildung 3-3 vermittelt einen Eindruck der globalen Spannweite und regionalen Unterschiede. Das große Diagramm zeigt die Projektionen für die gesamte Welt, das kleine, eingefügte Diagramm diejenigen für die industrialisierten Länder. Zu den letzteren zählen die Mitglieder der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung OECD im Jahre 1990 (OECD90) sowie die Nachfolgestaaten der UDSSR und Osteuropa (REF). Die wesentlichen Impulse für das globale Bevölkerungswachstum sind in den Entwicklungsländern Asiens sowie in Afrika, Lateinamerika und dem mittleren Osten zu erwarten.

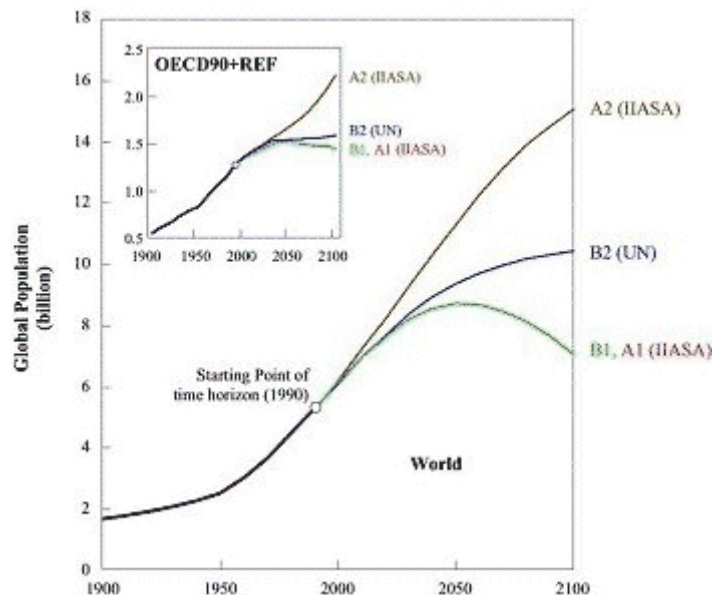


Abbildung 3-3: Bevölkerungsprognosen. Historische Daten von 1900 bis 1999 und Projektionen (IPCC, 2000).

3.4.2 Regionale Bevölkerungsprognosen

Auch wenn steigende Bevölkerungszahlen und damit einhergehende Zunahmen der Emissionen von Treibhausgasen nach den globalen Prognosen für Westeuropa nicht zu erwarten sind, spielt die Bevölkerung auch hier bezüglich des Nutzungsdrucks auf natürliche Ressourcen eine entscheidende Rolle. Um für Prognosen des Hochwasserrisikos an späterer Stelle in dieser Arbeit eine konsistente Grundlage zu schaffen, werden im Folgenden lokale Bevölkerungsprognosen gesammelt und anhand der Arbeit von Lutz et al. (1996) für den Untersuchungszeitraum fortgeschrieben.

In der 11. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung legten Eisenmenger et al. (2006) eine Prognose der Bevölkerungsentwicklung bis 2050 in Deutschland vor. Danach wird die prognostizierte Abnahme der Bevölkerung wesentlich von der Geburtenzahl und der Zuwan-

derung bestimmt. Die räumliche Auswirkung dieser Entwicklung bezüglich Bevölkerung, privaten Haushalten und Erwerbspersonen untersuchten Bucher et al. (2009) für das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung auf Kreisebene bis 2025 und auf größerer Ebene bis 2050. Auf diesen Erhebungen aufbauend legten Koschitzki et al. (2011) und Driefert (2011) zwei kleinräumige Bevölkerungsprognosen für die Kreise und kreisfreien Städte in Niedersachsen vor. Es sind typische Kohorten-Komponenten-Studien, die ihre Eingangsdaten aus der Regionalstatistik und den vorgenannten Quellen ableiten. Bei einem mittleren Migrationsüberschuss von 4 300 bis 7 500 Personen pro Jahr (Koschitzki et al., 2011), einer geringen Geburtenrate und leicht steigender Lebenserwartung können deutliche Veränderungen in der regionalen Bevölkerungsstatistik nur aus der Nahwanderung stammen. Insgesamt wird eine Abnahme der Bevölkerung um 9% (Koschitzki et al., 2011) bzw. 6,4 % (Driefert, 2011) bis 2030 vorhergesagt, wobei die räumliche Verteilung stark unterschiedlich ist (Abbildung 3-4).

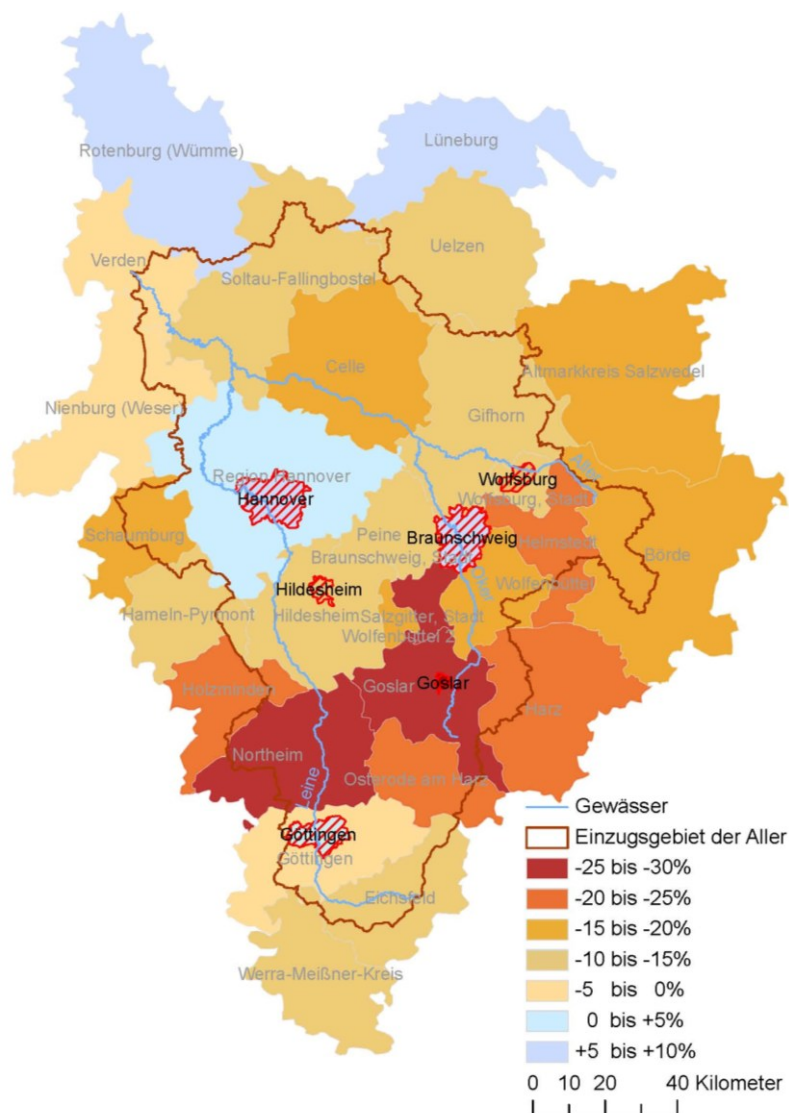


Abbildung 3-4: Bevölkerungsentwicklung nach Kreisen im Einzugsgebiet der Aller bis 2030, eigene Darstellung auf Grundlage von Driefert (2011) und Bucher et al. (2009).

In den Großstädten Hannover, Göttingen und Hildesheim, der kreisfreien Stadt Braunschweig sowie in zwei Landkreisen an der Grenze zu Hamburg wird die Zahl der Einwohner um bis zu 10% zunehmen. Im ländlichen Bereich wird allgemein eine Schrumpfung der Bevölkerung vorhergesagt, die im südlichen Niedersachsen und dort besonders im Harz 20% und mehr betragen kann (Driefert, 2011).

Um dem Erfordernis einer Prognose der regionalen Bevölkerung für den sehr langfristigen Zeitraum bis 2100 gerecht zu werden, wurden die zitierten Studien in geeigneter Weise zu einer eigenen Fortschreibung nach dem Kohorten-Komponenten-Verfahren zusammengeführt. Die Umrechnung der von Eisenmenger et al. (2006) vorgelegten oberen und unteren Deutschlandprognose bis 2050 auf Niedersachsen ermöglichte die Abbildung einer Bandbreite als Maß der Unsicherheit. Diese wurde mit der oberen und unteren Prognose aus Lutz et al. (1996) fortgeschrieben. Abbildung 3-5 zeigt das Ergebnis dieser Berechnung. Für das Szenario A1B führt ein niedriger Migrationsüberschuss von 4 300 Personen mit einer hohen Annahme zur Lebenserwartung (85 Jahre) und durchschnittlicher Fertilität (1,35) zu einem Sinken der Bevölkerung in Niedersachsen bis 2100 auf nur 3,7 Millionen Einwohner. Optimistischer ist die Prognose für das Szenario A2. Ein höherer Migrationsüberschuss von 7 900 Personen (Koschitzki et al., 2011) führt in Kombination mit einer deutlich höheren Fertilität von 2,0 zu einem Abklingen des Bevölkerungsrückgangs zum Ende des Jahrhunderts, obwohl in diesem Szenario eine etwas geringere Lebenserwartung von im Mittel 82 Jahren unterstellt ist.

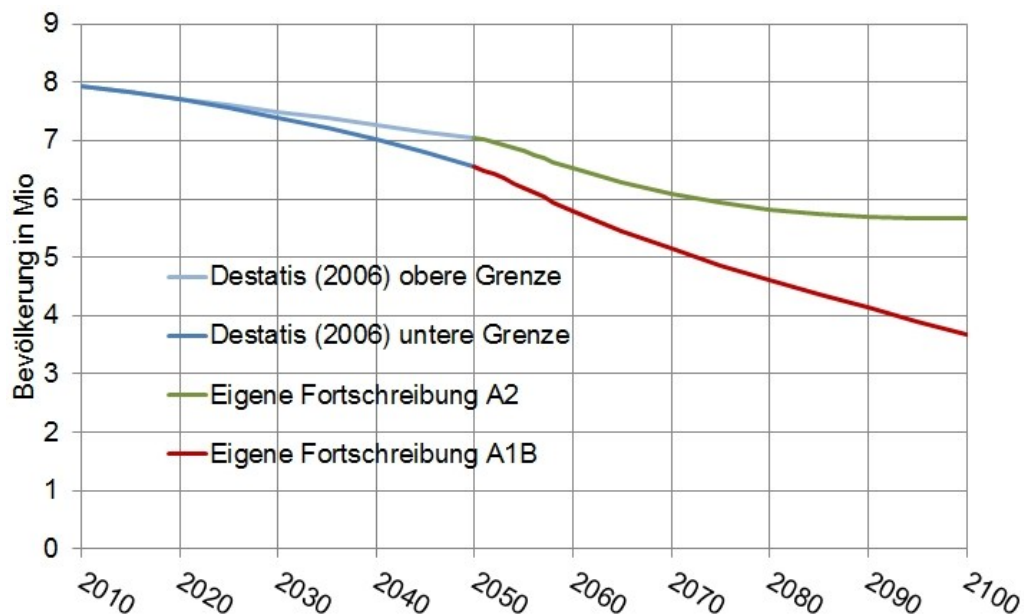


Abbildung 3-5: Demografische Szenarien für Niedersachsen. Eigene Fortschreibung auf Grundlage von Eisenmenger et al. (2006) und Lutz et al. (1996).

Im Mittel des Zeitraums der fernen Zukunft von 2071-210 beträgt der Bevölkerungsrückgang für das demografische Szenario A2 27%, der des Szenarios A1B hingegen 44%. Diese Szenarien finden Eingang in die Synopse des Kapitels 10.

3.5 Modellketten zur Modellierung des regionalen Klimawandels

Es sind sehr unterschiedliche Ansätze verfolgt worden, um den Einfluss des Klimawandels auf den Wasserhaushalt abzubilden. Die direkte Verwendung globaler Zirkulationsmodelle (GCM, Global Circulation Model, im Folgenden „Globalmodelle“) durch Bewertung ihres Vermögens, regionale Niederschlagsmuster zutreffend wiederzugeben, ist eine sehr kostengünstige Methode (Krol et al., 2011). Asokan und Dutta (2008) nutzten Beobachtungsdaten von 6 Niederschlagsstationen und die Thiessen-Polygon-Methode, um den Niederschlag aus vier Gitterzellen des Kanadischen CGCM2 (Flato et al., 2000) auf das rund 141 000 km² große Mahanadi-Einzugsgebiet in Indien herunter zu skalieren. Jedoch kann die direkte Anwendung von Daten aus Globalmodellen den Einfluss von regionaler Orografie und Landnutzung nicht angemessen berücksichtigen. Für die Überwindung solcher Ungenauigkeiten wird die Anwendung regionaler Klimamodelle (RCM, Regional Climate Model, im Folgenden „Regionalmodelle“) oder stochastisches Downscaling seit langem propagiert (Evans und Schreider, 2002).

O'Brien et al. (2010) zeigten den signifikanten Einfluss von Landnutzungsänderungen auf regionale Klimamodelle. Sie erzeugten mit RegCM3 durch zufällige, sehr kleine Änderungen der Startbedingungen ein Ensemble von 20 Simulationsläufen. Durch statistische Analyse des Ensembles gelang es den Autoren, die intrinsische Variabilität („das Rauschen“) des Regionalmodells von dem durch die Landnutzungsänderung von Nadel- zu Laubwald erzeugten physikalischen Signal in Form von Niederschlagsanomalien zu trennen. Die Unterscheidung von Rauschen und echten Signalen und die Abschätzung der Unsicherheiten von Klimaänderungsvorhersagen sind die Hauptgründe für die Anwendung von Regionalmodell-Ensembles, die von Globalmodell-Ensembles angetrieben werden.

Für die Abschätzung des Einflusses des Klimawandels auf den Wasserhaushalt hat sich folgender, von Bergström et al. (2001) vorgeschlagener vierstufiger Szenarioansatz durchgesetzt:

1. Die Wahl eines oder mehrerer Klimawandelszenarien aus einem oder mehreren Globalmodellen;
2. die Herunterskalierung („Downscaling“) des Globalmodell-Ergebnisses beziehungsweise der -Ergebnisse auf den Größenmaßstab des zu untersuchenden Gebietes mit einem oder mehreren Regionalmodellen;
3. der Antrieb eines an Beobachtungsdaten kalibrierten hydrologischen Modells mit den Ergebnissen des Regionalmodells; und schließlich
4. der Vergleich der Simulationsergebnisse für gegenwärtiges Klima sowie Zukunftsszenarien zur Abschätzung der Änderungen.

Im deutschen Projekt KLIWAS (BMVBS, 2011) kommt eine solche Modellkette, bestehend aus sieben Globalmodellen, 14 Regionalmodellen, 15 hydrologischen Modellen sowie einer Reihe von hydrodynamischen und Wasserqualitätsmodellen zur Anwendung, um die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt abzuschätzen und Anpassungsoptionen zu entwickeln. Dieses Projekt ist eines der wenigen, in dem die für einen solchen umfassenden Ansatz erforderlichen enormen Ressourcen bereitgestellt werden konnten.

Im süddeutschen Projekt KLIWA werden seit 1999 auf der Grundlage einer Rahmenvereinbarung der Länder Baden-Württemberg, Bayern und seit 2006 auch Rheinland-Pfalz Klimaänderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft untersucht (KLIWA, 2006). Es ist damit das langfristigste und umfangreichste deutsche Projekt zur Klimafolgenforschung. Als Globalmodelle werden ECHAM4 und ECHAM5 eingesetzt, für die Regionalisierung finden REMO, WETTREG, CLM und COSMO-CLM Anwendung. Die Länder Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz entschieden sich für eine flächendeckende Modellierung des Wasserhaushalts mit dem Modell LARSIM (Bremicker, 2000), wohingegen Bayern hierfür das Modell WASIM-ETH (Schulla, 1997) einsetzt. Mit der Einführung des Lastfalls „Klimaänderung“ hat die Klimafolgenforschung Eingang in wasserwirtschaftliche Planungen gefunden. Ein Klimaänderungsfaktor erhöht den Bemessungsabfluss für neue Hochwasser-schutzanlagen in Bayern bis zum HQ₁₀₀ pauschal um 15% und beim HQ₂₀₀ um 7,5% (BLfU, 2005). In Baden-Württemberg ist der Klimaänderungsfaktor feiner abgestuft. Er beginnt beim HQ₂ mit 50%, um bis zum HQ₁₀₀ auf 15% zu sinken. Für das HQ₂₀₀ beträgt er 8%, für das HQ₅₀₀ noch 3%. „Bei höheren Jährlichkeiten, wie zum Beispiel bei der Bemessung von Talsperren und Rückhaltebecken, kann ... auf einen Zuschlag verzichtet werden“ (BLfU, 2005). Detaillierte Untersuchungen zum Einfluss des Klimawandels auf die Talsperren im Schwarzwald oder in den Bayerischen Alpen sind im Projekt KLIWA derzeit nicht vorgesehen.

Für die Untersuchung regionaler Klimaentwicklungen soll eine möglichst große Bandbreite von Klimamodellen und Emissionsszenarios herangezogen werden. Ist dies nicht umsetzbar, wird eine Konzentration auf das mittlere Szenario A1B, und neben der Verwendung eines Globalmodells mindestens die Verwendung eines dynamischen sowie eines statistischen Regionalmodells empfohlen (Haberlandt et al., 2012). Dem folgte das Projekt KLIFWA, das Teil des Niedersächsischen Projekts Klimafolgenforschung in Niedersachsen KLIFF war. Das Globalmodell ECHAM5/MPI-OM (Roeckner et al., 2003) diente dem Antrieb des regionalen dynamischen Klimamodells REMO (Jacob et al., 2008) und des statistischen Modells WETTREG (Spekat et al., 2007). Mit den Ergebnissen für die Vergangenheit 1971-2000 (C20) sowie dem Emissionsszenario A1B für den Zeitraum 2001-2100 wurden das ökohydrologische Modell SWAT, das hydrologische Modell HEC-HMS und das Wasserhaushaltsmodell PANTA RHEI (Riedel et al., 2011) angetrieben. Die für die vorliegende Arbeit relevanten Modelle zeigt die Abbildung 3-6.

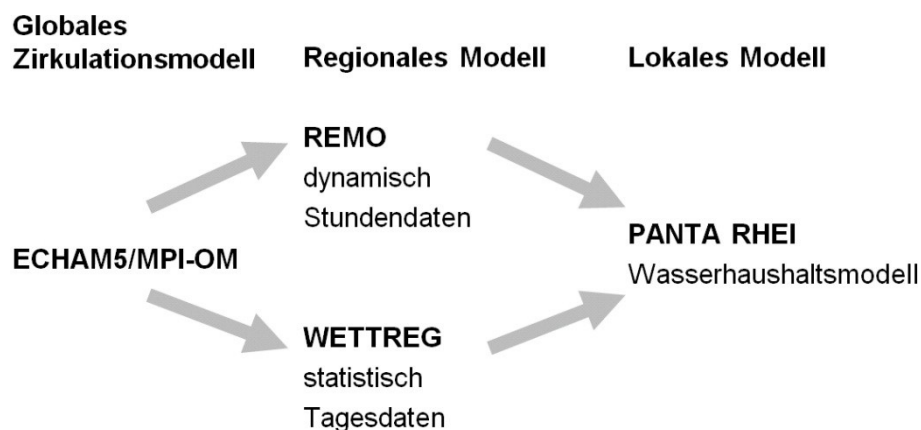


Abbildung 3-6: Modellkette zur Abschätzung des Klimawandel-Einflusses auf den Wasserhaushalt.

Auch eine so begrenzte Modellkette kann nur von mehreren Partnern abgearbeitet werden. Die Anpassung und Anwendung von PANTA RHEI für Einzugsgebiete im Binnenland war die Aufgabe, die die Abteilung Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässergüte am Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig übernahm. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich dabei als Teilprojekt von KLIFWA auf die Untersuchung des Klimawandel-Einflusses auf die Talsperren des Westharzes und Möglichkeiten der Betriebsanpassung.

3.6 Das globale Zirkulationsmodell ECHAM5/MPI-OM

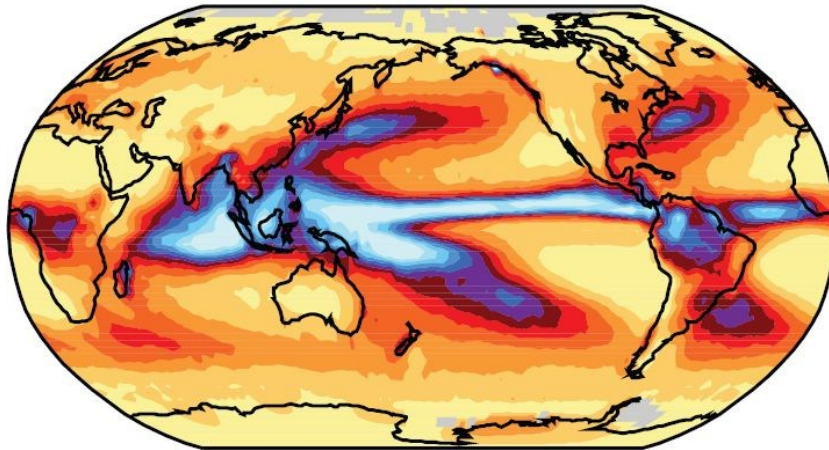
Im Rahmen des vierten Sachstandsberichtes des Weltklimarats wurde ein Multimodell-Ensemble mit insgesamt 23 Mitgliedern ausgewertet, um Aussagen über Klimaveränderungen auf eine möglichst breite und damit wohlfundierte Basis zu stellen. Werden Klimamodelle als Global Circulation Model (GCM) bezeichnet, ist damit eigentlich nur das Modell der Atmosphäre genannt. Alle Modelle des IPCC-Ensembles verfügen jedoch auch über eine Ozeankomponente. Die eigentlich richtige, aber häufig zu GCM verkürzte Bezeichnung ist daher AOGCM (Atmosphere Ocean Global Circulation Model). Im Folgenden wird für diese Modelle die Bezeichnung ‚Globalmodell‘ verwendet.

Der deutsche Beitrag zu diesem Multimodell-Ensemble ist ECHAM5/MPI-OM. Das Modell besteht aus zwei Hauptkomponenten, dem Atmosphären- und Landoberflächenmodell ECHAM5, sowie dem Ozeanmodell MPI-OM. Die horizontale Auflösung des Atmosphärenmodells beträgt $1,875^\circ$, die des Ozeanmodells $1,5^\circ$, der Gitterabstand am Äquator entspricht im Atmosphärenmodell etwa 200 km und im Ozeanmodell etwa 150 km (Roeckner et al., 2006). Zu den Polen hin werden die Gitterzellen schmaler. Das Modell enthält sowohl in diesem Gitter darstellbare, also räumlich aufgelöste Prozesse, als auch solche, die eigentlich einer viel höheren Auflösung bedürfen und daher nur als Parametrisierungen implementiert werden können. Parametrisierungen basieren typischer Weise auf vereinfachten physikalischen Modellen der räumlich nicht aufgelösten Prozesse sowie numerischer Parameter, die als Eingangsgrößen spezifiziert werden müssen. Einige dieser Parameter sind – zumindest prinzipiell – messbar, andere hingegen nicht. Daher werden die Werte der Parameter im Allgemeinen kalibriert, um die Modellsimulation spezieller Variablen oder der allgemeinen Wärmebilanz zu optimieren (IPCC, 2007).

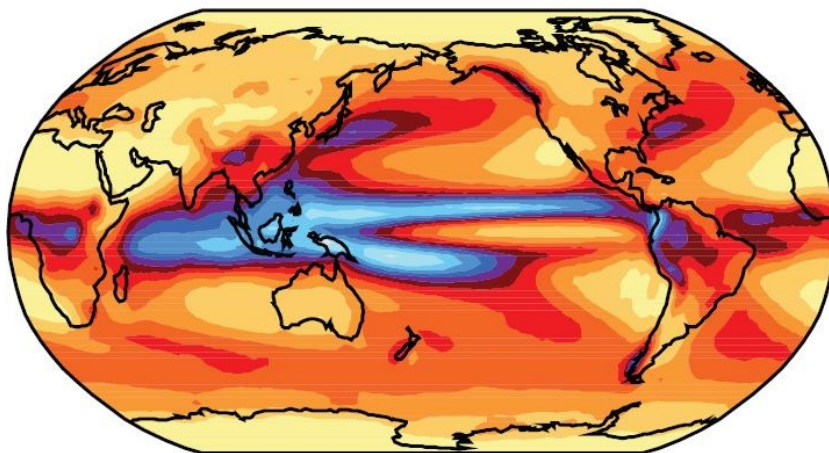
Die Untersuchung, wie gut Klimamodelle den Niederschlag nicht nur global, sondern auch regional simulieren können, ist von praktischem Interesse, da die Änderung von Niederschlagsmustern tiefgreifende Auswirkungen haben kann. Als ein Beispiel für die Qualität globaler Klimamodelle zeigt Abbildung 3-7 oben messwertgestützte Einschätzungen des mittleren jährlichen Niederschlags (CMAP, Xie und Arkin, 1997), in der Mitte das Multi-Modell-Mittel des vierten Sachstandsberichts und unten Ergebnisse von ECHAM5/MPI OM für die Zeitreihe 1980 bis 1999.

Anders als saisonale Temperaturvariationen, die hauptsächlich vom Einstrahlungsmuster und den Kontinenten beeinflusst sind, werden Niederschlagsvariationen auch stark durch vertikale Luftbewegungen aufgrund atmosphärischer Instabilitäten und den Luftfluss über Gebirgen bestimmt.

CMAP



Mean Model



ECHAM5/MPI-OM

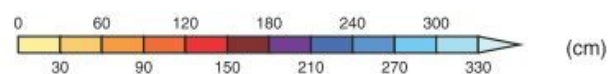
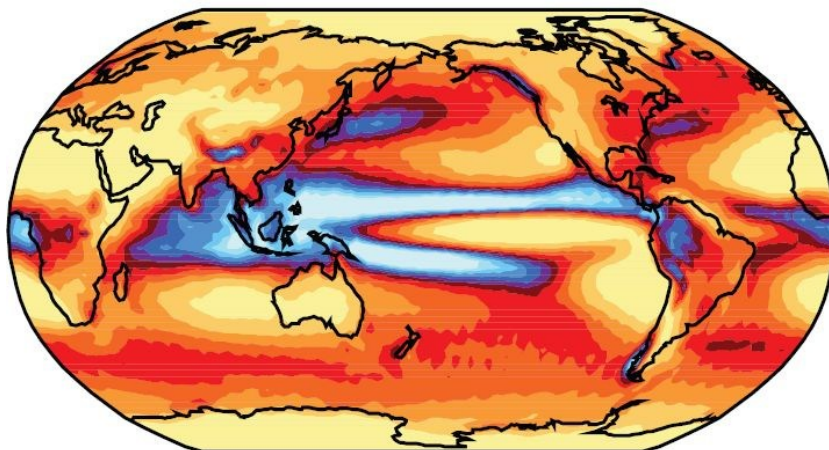


Abbildung 3-7: Mittlerer jährlicher Niederschlag in cm der Zeitreihe 1980 - 1999, beobachtet (CMAP), als Multi-Modell-Mittel aus 23 Modellen s (Mean Model) und als Ergebnis von ECHAM5 MPI-OM (IPCC 2007).

Um das saisonal variierende Niederschlagsmuster akkurat zu modellieren, müssen Modelle eine Reihe von Prozessen, beispielsweise Evapotranspiration, Kondensation und Transport richtig abbilden, die auf globalem Maßstab schwierig zu bewerten sind. Auf größtem Maßstab reflektieren die niedrigeren Niederschläge in hohen Breiten sowohl reduzierte lokale Evaporation bei niedrigeren Temperaturen als auch einen geringeren Sättigungsdampfdruck der kühleren Luft, der tendenziell den Transport von Wasserdampf aus anderen Regionen hemmt.

Neben diesem großskaligen Phänomen wird ein lokales Niederschlagsminimum nahe des Äquators im Pazifik durch die Modelle gut wiedergegeben. Es resultiert aus einer Tendenz der innertropischen Konvergenzzone, sich abseits des Äquators aufzuhalten. Weiterhin gibt es lokale Maxima in mittleren Breiten, die die Neigung von Senken repräsentieren, Niederschlag in den Subtropen zu unterdrücken und die Neigung von Sturmsystemen, Niederschlag in gemäßigten Zonen zu erhöhen. Die Darstellung dieser großskaligen zonalen mittleren Niederschlagsunterschiede in den Modellen zeigt, dass sie diese Charakteristiken der atmosphärischen Zirkulation adäquat repräsentieren (IPCC, 2007). Während das Multi-Modell-Mittel den Niederschlag in der Innertropischen Konvergenzzone leicht unterschätzt, liegen die Ergebnisse von ECHAM5 MPI-OM leicht darüber.

3.7 Regionale Klimamodelle

Da die Auflösung der Globalmodelle für Aussagen zum regionalen Klimawandel nicht ausreicht, wurden zahlreiche Regionalisierungsverfahren entwickelt, um räumlich detailliertere Aussagen zu gewinnen. Grundsätzlich sind dabei dynamische und statistische Verfahren zu unterscheiden (Spekat et al., 2007).

Dynamische Verfahren simulieren mit einem höher aufgelösten Modell Parameter für Teilgebiete des globalen Modellgebietes und nutzen dazu Eingangsdaten aus dem globalen Modell. Das Regionalmodell REMO (Jacob et al., 2008) ist ein Beispiel für ein dynamisches Modell.

Statistische Verfahren gehen davon aus, dass die globalen Modelle im großräumigen Maßstab in der Lage sind, die Muster der atmosphärischen Zirkulation treffend zu beschreiben. Bei den meisten dieser Verfahren werden statistische Beziehungen zwischen den großräumigen Wetterlagen und den lokalen Auswirkungen identifiziert, wobei die aus der Vergangenheit gewonnenen Beziehungen auf die Zukunftsprojektionen der globalen Modelle angewendet werden (Spekat et al., 2007). Dies setzt voraus, dass diese Beziehungen statisch sind. In einem geänderten Klima können sich die statistischen Beziehungen zwischen lokalen Ereignissen und globalen Wetterlagen jedoch verändern. WETTREG ist ein Beispiel für ein statistisches Modell.

Die Ergebnisse dieser regionalen Klimamodelle variieren insbesondere in Bezug auf den Niederschlag sowohl in der jahreszeitlichen als auch in der räumlichen Entwicklung teilweise. Sowohl WETTREG als auch REMO projizieren aber für dieses Jahrhundert einen deutlichen Rückgang der Niederschläge im Sommer und eine Zunahme im Winter. Dabei ist der Rückgang der Niederschläge im Sommer insbesondere im Norden (bei REMO auch im Süden)

Deutschlands zu beobachten, während im Winter vor allem in den Gebirgen eine Zunahme des Niederschlags berechnet wird (Spekat et al. 2007).

3.7.1 REMO

Das dreidimensionale hydrostatische regionale Klimamodell REMO (REgional MOdell) ist ein atmosphärisches Zirkulationsmodell, das die relevanten physikalischen Prozesse dynamisch berechnet. Hierdurch werden insbesondere nicht-lineare Zusammenhänge berücksichtigt. Subskalige, das heißt nicht vom Modell auflösbare physikalische Prozesse wie z. B. Konvektionsbildung, werden durch physikalisch basierte Parametrisierungen berechnet. In der für die Regionalisierung verwendeten Version ist REMO hydrostatisch, d.h. die vertikale Luftdruckverteilung geht von einer ruhenden Atmosphäre aus. Aufwind am Gebirgsrand kann in einem hydrostatischen Modell nicht wiedergegeben werden. Hierzu sind hydrodynamische Modelle erforderlich. Auch REMO liegt mittlerweile in dieser Form vor.

REMO ist aus dem Europa-Modell des Deutschen Wetterdienstes (DWD) hervorgegangen. Die prognostischen Variablen des Modells sind die horizontalen Windkomponenten, der Bodendruck, Temperatur, spezifische Feuchte sowie Flüssigwassergehalt der Luft.

REMO kann wahlweise mit Reanalysedaten (beispielsweise CMAP, Xie und Arkin, 1997) oder mit Informationen aus globalen Klimamodellen betrieben werden. Ist REMO einmal im Simulationsgebiet mit globalen Daten initialisiert, treiben kontinuierlich veränderliche globale Daten den Rechenlauf an. Während der Modellrechnung werden an den seitlichen Rändern nur Temperatur, Druck, Wind und Luftfeuchtigkeit vorgegeben. Alle anderen Größen werden sowohl am Rand als auch im Modellgebietsinneren von REMO direkt berechnet.

Regionale Simulationen müssen auf ihre Realitätsnähe in der Vergangenheit überprüft werden, um die Plausibilität von Klimaänderungsszenarien zu bewerten. Hierfür wurde ein Validierungslauf für den Zeitraum 1979-2003 durchgeführt, bei dem für die notwendigen Anfangs- und Randwerte die Reanalysen des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (EZMW) verwendet worden sind. Diese Reanalysen beschreiben so realitätsnah wie möglich die real beobachteten Wetterabläufe der betrachteten Zeitperiode, da sie alle verfügbaren Beobachtungsdaten nach einer Qualitätskontrolle mittels Datenassimilation in das Reanalysemodell aufnehmen. Es erstellt dann auf dem Modellgitter einen in Zeit und Raum konsistenten Datensatz, der als beobachtungsnahe Klimatologie angesehen werden kann.

Die Ergebnisse des regionalen Validierungslaufs können mit unabhängigen Beobachtungen, wie z. B. den Messungen des Deutschen Wetterdienstes, verglichen werden, um etwaige systematische Abweichungen festzustellen.

Als Antrieb für den UBA-Lauf von REMO diente der Lauf 1 des Globalmodells ECHAM5/MPI-OM, sodass REMO ein regionales Klima unter Berücksichtigung der globalen Informationen und der lokalen und regionalen Gegebenheiten errechnete. Damit wurde basierend auf den Emissionsszenarien A1B, B1 und A2 regional hoch aufgelöste Klimaszenarien für Deutschland mit einer horizontalen Auflösung von $0,088^\circ$ (ca. 10 km) und den Zeitraum 2010-2100 erstellt (Jacob et al., 2008). Der UBA-Lauf von REMO für das Szenario A1B war das Refe-

renzscenario innerhalb von KLIFWA, jedoch fand in dieser Arbeit auch der BFG-Lauf von REMO Verwendung. Letzterer entstand im Rahmen des Forschungsprojektes KLIWAS für das Szenario A1B, um die Unsicherheiten insbesondere der Extremwerte der mit REMO erstellten regionalen Klimaszenarien besser abschätzen zu können (Nilson et al., 2009). Er wurde durch den Lauf 2 des Globalmodells ECHAM5/MPI-OM angetrieben.

Die Tabelle 3-1 zeigt die verfügbaren regionalen Angaben nach Bundesländern zur Temperatur aus Jacob et al. (2008). Gemittelt für jedes Bundesland und jede Jahreszeit sind die minimale und die maximale Veränderung aus den drei Emissionsszenarien (A1B, B1 und A2) angegeben. Zum Beispiel weist das minimale Szenario für Niedersachsen im Winter eine Temperaturzunahme in der nahen Zukunft (2021-2050) von 0,9°C auf, während das maximale Szenario eine Temperaturzunahme von 1,8 °C prognostiziert.

Tabelle 3-1: *Änderung der Temperatur in °C in der nahen Zukunft 2021-2050 (oben) und der fernen Zukunft 2071–2100 (unten) im Vergleich zur Periode 1961-1990 (UBA 2008, verändert).*

	Winter		Fruehjahr		Sommer		Herbst		Jahr	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
Bayern	1.1	1.9	-0.2	1.1	0.7	1.7	0.9	1.7	0.6	1.6
Berlin	1.0	1.8	-0.1	0.9	0.6	1.4	0.8	1.8	0.6	1.5
Brandenburg	1.0	1.9	-0.1	0.9	0.6	1.4	0.8	1.9	0.6	1.5
Bremen	0.9	1.8	0.0	0.9	0.6	1.4	0.6	1.7	0.5	1.4
Hamburg	0.9	1.8	0.0	1.0	0.7	1.4	0.6	1.7	0.6	1.5
Hessen	1.0	1.8	-0.2	0.9	0.6	1.7	0.7	1.7	0.5	1.5
Mecklenburg Vorpommern	0.9	1.8	0.0	1.1	0.7	1.4	0.8	1.8	0.6	1.5
Niedersachsen	0.9	1.8	-0.1	0.9	0.7	1.4	0.6	1.7	0.5	1.4
Nordrhein Westfalen	0.9	1.7	-0.1	0.9	0.7	1.5	0.6	1.7	0.5	1.4
Rheinland Pfalz	1.0	1.8	-0.1	1.1	0.6	1.7	0.7	1.7	0.6	1.6
Saarland	1.1	1.8	0.0	1.2	0.7	1.8	0.7	1.7	0.6	1.6
Sachsen	1.0	1.9	-0.2	0.8	0.6	1.4	0.8	1.8	0.5	1.5
Sachsen Anhalt	1.0	1.8	-0.2	0.9	0.6	1.4	0.7	1.8	0.5	1.5
Schleswig Holstein	0.8	1.8	0.1	1.1	0.7	1.4	0.7	1.7	0.6	1.5
Thueringen	1.0	1.8	-0.2	0.9	0.7	1.6	0.7	1.8	0.6	1.5
Baden-Wuerttemberg	1.1	1.9	-0.2	1.2	0.7	1.8	0.8	1.7	0.6	1.6
Mittel	1.0	1.8	-0.1	1.0	0.7	1.5	0.7	1.7	0.6	1.5

	Winter		Fruehjahr		Sommer		Herbst		Jahr	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
Bayern	2.6	4.2	1.3	2.0	2.5	4.0	2.6	3.9	2.2	3.5
Berlin	2.6	3.9	1.3	2.0	1.8	3.0	2.3	3.4	2.0	3.0
Brandenburg	2.7	3.9	1.3	2.0	1.9	2.9	2.4	3.4	2.0	3.1
Bremen	2.5	3.6	1.2	2.0	1.9	3.0	2.1	3.2	1.9	2.9
Hamburg	2.5	3.6	1.2	2.1	1.8	2.9	2.1	3.1	1.9	2.9
Hessen	2.5	3.8	1.0	1.8	2.4	3.6	2.3	3.6	2.1	3.2
Mecklenburg Vorpommern	2.6	3.7	1.5	2.2	1.9	2.8	2.3	3.2	2.0	3.0
Niedersachsen	2.5	3.6	1.2	1.9	1.9	3.0	2.1	3.2	1.9	2.9
Nordrhein Westfalen	2.3	3.5	1.1	1.8	2.2	3.3	2.2	3.4	1.9	3.0
Rheinland Pfalz	2.4	3.7	1.1	1.9	2.5	3.7	2.4	3.7	2.1	3.3
Saarland	2.4	3.8	1.1	2.0	2.7	4.0	2.4	3.9	2.2	3.4
Sachsen	2.7	4.0	1.2	1.8	2.1	3.2	2.4	3.6	2.1	3.2
Sachsen Anhalt	2.6	3.9	1.2	1.9	2.0	3.1	2.3	3.4	2.0	3.1
Schleswig Holstein	2.5	3.5	1.4	2.2	1.8	2.7	2.1	3.0	1.9	2.9
Thueringen	2.6	3.9	1.1	1.9	2.3	3.4	2.4	3.6	2.1	3.2
Baden-Wuerttemberg	2.5	4.1	1.2	2.0	2.7	4.1	2.6	4.0	2.2	3.6
Mittel	2.5	3.8	1.2	2.0	2.2	3.3	2.3	3.5	2.0	3.1

Für die farbige Darstellung wurden das Minimum aus beiden Tabellen (-0,2) dunkelblau, das Maximum (4,2) hingegen dunkelrot eingefärbt. Für das Mittel wurde weiß gewählt. Je heller

ein Wert dargestellt ist, umso näher liegt er am Mittel aus beiden Perioden. Während in der nahen Zukunft (2021-2050) eine Abnahme der Temperatur überwiegt, zeigt die ferne Zukunft (2071-2100) überwiegend eine deutliche Zunahme (rote Farbtöne). Insbesondere in der zweiten Periode sind in Sommer und Herbst für Bayern und Baden-Württemberg Extreme zu erkennen. Die Temperaturänderung in Niedersachsen liegt für beide Perioden in Nähe oder knapp unterhalb des Mittelwertes für Deutschland, der jeweils in der letzten Zeile dargestellt ist. Tabelle 3-2 stellt die prozentuale Veränderung des Niederschlages der Perioden 2021–2050 und 2071–2100 im Vergleich zur Periode 1961–1990 dar. Die Farbdarstellung wurde entsprechend Tabelle 3-1 gewählt.

Tabelle 3-2: Relative Änderung [%] des Niederschlages der Periode 2021-2050 (oben) und der Periode 2071–2100 im Vergleich zur Periode 1961–1990 (UBA 2008 verändert).

	Winter		Frühjahr		Sommer		Herbst		Jahr	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
Bayern	3.0	15.0	10.0	14.0	-4.0	1.0	0.0	17.0	2.0	8.0
Berlin	-2.0	10.0	1.0	8.0	-7.0	4.0	-5.0	10.0	-2.0	6.0
Brandenburg	0.0	9.0	3.0	8.0	-9.0	7.0	-3.0	10.0	-3.0	7.0
Bremen	1.0	14.0	-2.0	3.0	1.0	10.0	-1.0	17.0	0.0	9.0
Hamburg	4.0	12.0	1.0	5.0	-7.0	8.0	7.0	20.0	4.0	8.0
Hessen	-2.0	11.0	7.0	9.0	-5.0	8.0	7.0	16.0	2.0	10.0
Mecklenburg Vorpommern	0.0	12.0	3.0	13.0	-8.0	4.0	1.0	11.0	-2.0	7.0
Niedersachsen	1.0	12.0	1.0	3.0	-2.0	8.0	1.0	17.0	1.0	8.0
Nordrhein Westfalen	0.0	11.0	6.0	8.0	-2.0	7.0	2.0	14.0	2.0	9.0
Rheinland Pfalz	-2.0	12.0	7.0	12.0	-6.0	9.0	7.0	14.0	3.0	11.0
Saarland	-5.0	17.0	3.0	12.0	-9.0	7.0	-1.0	12.0	-1.0	11.0
Sachsen	3.0	11.0	5.0	15.0	-8.0	6.0	1.0	16.0	1.0	9.0
Sachsen Anhalt	2.0	12.0	6.0	9.0	-3.0	9.0	3.0	17.0	2.0	11.0
Schleswig Holstein	7.0	15.0	-3.0	6.0	-11.0	6.0	7.0	12.0	2.0	8.0
Thüringen	1.0	12.0	8.0	9.0	-8.0	1.0	5.0	18.0	0.0	8.0
Baden-Wuerttemberg	-3.0	16.0	8.0	13.0	-5.0	2.0	-1.0	12.0	1.0	8.0
Mittel	0.5	12.6	4.0	9.2	-5.8	6.1	1.9	14.6	0.8	8.6

	Winter		Frühjahr		Sommer		Herbst		Jahr	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
Bayern	7.0	19.0	12.0	26.0	-23.0	-12.0	-2.0	11.0	-2.0	6.0
Berlin	10.0	13.0	9.0	19.0	-14.0	0.0	0.0	11.0	1.0	7.0
Brandenburg	9.0	14.0	7.0	15.0	-17.0	-9.0	-2.0	9.0	-2.0	3.0
Bremen	12.0	18.0	1.0	9.0	-18.0	-12.0	3.0	18.0	-1.0	4.0
Hamburg	19.0	23.0	5.0	14.0	-13.0	-11.0	14.0	20.0	6.0	9.0
Hessen	10.0	20.0	8.0	13.0	-19.0	-16.0	2.0	15.0	1.0	4.0
Mecklenburg Vorpommern	17.0	18.0	8.0	17.0	-19.0	-12.0	6.0	16.0	0.0	6.0
Niedersachsen	11.0	19.0	6.0	10.0	-19.0	-12.0	5.0	16.0	1.0	4.0
Nordrhein Westfalen	7.0	19.0	9.0	13.0	-20.0	-14.0	2.0	12.0	0.0	6.0
Rheinland Pfalz	11.0	21.0	10.0	16.0	-21.0	-17.0	3.0	15.0	2.0	4.0
Saarland	11.0	20.0	4.0	10.0	-28.0	-24.0	-7.0	10.0	-3.0	1.0
Sachsen	8.0	15.0	10.0	23.0	-15.0	-6.0	3.0	14.0	0.0	6.0
Sachsen Anhalt	10.0	18.0	8.0	11.0	-13.0	-6.0	8.0	21.0	3.0	6.0
Schleswig Holstein	22.0	27.0	7.0	15.0	-18.0	-13.0	9.0	14.0	4.0	7.0
Thüringen	10.0	18.0	7.0	14.0	-17.0	-15.0	7.0	20.0	1.0	4.0
Baden-Wuerttemberg	8.0	20.0	9.0	19.0	-29.0	-19.0	-4.0	8.0	-4.0	2.0
Mittel	11.4	18.9	7.5	15.3	-18.9	-12.4	2.9	14.4	0.4	4.9

Die Änderungen der Niederschläge stellen sich sehr viel unregelmäßiger dar, als die der Temperaturen. Die ferne Zukunft zeigt jedoch eine deutliche Erhöhung des Niederschlages im Winter und eine ebenso deutliche Verringerung im Sommer. Wieder sind für Süddeutschland insbesondere in der zweiten Periode extreme Änderungen ablesbar. Die Werte für Nieder-

sachsen entfernen sich zwar weiter vom Deutschland-Mittel als bei den Temperaturen, jedoch finden sich für dieses Bundesland keine Extreme.

3.7.2 WETTREG

Der Vorteil statistischen Downscalings gegenüber dynamischer Modellierung besteht im wesentlich geringeren Rechenaufwand. Unterschiedliche Methoden des statistischen Downscalings werden in Kapitel 4 genannt. Enke und Spekat (1997) beschreiben statistisches Downscaling als eine Umkehrung der Parametrisierungsverfahren in Globalmodellen, da versucht wird, subskalige Prozesse aus großräumigen Mustern abzuleiten. WETTREG (Wetterlagenbasierte Regionalisierung) beruht auf der Klassifikation von Wetterlagen und der Regression von Beobachtungsdaten, einer Methode, die beim Deutschen Wetterdienst bereits eine 30-jährige Geschichte hat.

Die Klassifikation erfordert Rasterfelder der Klimavariablen im Tageszeitschritt in unterschiedlichen Höhenlagen der Atmosphäre. Ursprünglich wurde die Klassifikation von Wetterlagen subjektiv von Meteorologen vorgenommen. Die bekannteste in Deutschland ist der Kalender der Großwetterlagen nach Baur et al. (1944). Die Analyse der Häufigkeit und Stärke solcher Großwetterlagen wurden beispielsweise von Petrow und Merz (2009) erfolgreich in der Klimafolgenforschung eingesetzt. Zunehmende Rechenkapazitäten in den letzten Jahren ermöglichten objektive Klassifikationen. Enke et al. (2005) entwickelten eine solche mit dem Ziel, einen stochastischen Wettergenerator zu konditionieren. Für jede Klimavariablen einzeln und für jede Jahreszeit muss in diesem Verfahren die Einordnung in zehn Temperatur- und acht Niederschlagsregime erfolgen. Die Häufigkeit des Auftretens wird im Globalmodell für Vergangenheit und Zukunft erfasst.

Die Regression erfordert Beobachtungsdaten an Klimastationen im Tageszeitschritt. Konditionale, lineare und multiple Regression ist für das Downscaling besonders geeignet. Die Beobachtungsdaten werden auf Anomalien, also Abweichungen vom Mittelwert, untersucht und danach geordnet. Anschließend kombiniert ein Wettergenerator gestartet die positiven und negativen Anomalieperioden zu einer Realisierung, d.h. zu einer fiktiven Reihe. Die Klimaänderung wird durch die Häufigkeitsverteilung der zehn Temperatur- und acht Niederschlagsregime repräsentiert. Die in einem geänderten Klima zu erwartenden neue Extreme werden mit Hilfe von Regressionsbeziehungen zwischen der Wetterlagenklassifikation der Zukunft und der der Vergangenheit entwickelt. WETTREG generiert lokale Zeitreihen für diejenigen Stationen, deren Eingangsdaten für die Regression verwendet wurden (Enke et al., 2005b).

Mit WETTREG wurden Simulationen für den Kontrollzeitraum 1961-1990 und den Zeitraum 2010-2100 auf Basis der Ergebnisse des Globalmodells ECHAM5/MPI-OM und der SRES-Emissionsszenarios A1B, A2 und B1 des IPCC durchgeführt. Eingangsdaten des Modells sind neben dem Globalmodell meteorologische Daten von 282 Klimastationen und 1 695 Niederschlagsstationen in ganz Deutschland. (Spekat et al. 2007).

Wiederholte Läufe des Wettergenerators führen zu 20 Realisationen der Vergangenheit und Zukunft, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit ausgewertet werden konnten. Für die Anwendung im Rahmen des Projekts KLIF wurden die Ergebnisse von WETTREG für Ver-

gangenheit und Zukunft durch Haberlandt et al. (2012) auf ein 25 km²-Raster interpoliert und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt.

4 Wasserhaushaltsmodelle zur Simulation des Einflusses von Klimaänderungen auf Speichersysteme

Dieses Kapitel diskutiert Anforderungen an Wasserhaushaltsmodelle, die den Einfluss des Klimawandels auf den Betrieb von Speichersystemen abbilden sollen. Nach einer allgemeinen Einführung werden Skaleneffekte und die Zeitstabilität von Modellparametern diskutiert.

Danach wird ein internationaler Überblick über die Anwendung von Wasserhaushaltsmodellen zur Simulation des Einflusses von Klimaänderungen auf Speichersysteme gegeben.

Eine Diskussion fasst die Ergebnisse des internationalen Überblicks zusammen und leitet zur Vorstellung des Wasserhaushaltsmodells PANTA RHEI und seiner Besonderheiten über.

4.1 Wasserhaushaltsmodelle

In Niederschlag-Abfluss-Modellen (NA-Modell) werden einzelne Starkregenereignisse betrachtet, um daraus Hochwasserscheitel in einem Einzugsgebiet zu ermitteln. Dabei ist die Bodenfeuchte als Anfangsbedingung wichtig. Die Verdunstung ist von untergeordneter Bedeutung. Der Übergang vom NA-Modell zum Wasserhaushaltsmodell ist durch die langfristige Bilanzierung gekennzeichnet. Im Wasserhaushaltsmodell spielen Jahresgang der Verdunstung und die damit korrespondierende Bodenfeuchte eine wichtige Rolle. Dennoch können einfache, ursprünglich für die NA-Modellierung entworfene Verfahren weiter verwendet werden. Beispielsweise trennt das für die ereignisbasierte Hochwassermodellierung entwickelte SCS-Verfahren (USDA, 1986) den Niederschlag in Abhängigkeit von Randbedingungen zu Bodenart, -nutzung, -feuchte und Jahreszeit in Effektivniederschlag und Rückhalt. Nur der Effektivniederschlag ist für das einzelne Hochwasserereignis wichtig. Im Wasserhaushaltsmodell kann der Rückhalt, auf verschiedene Bodenspeicher verteilt, langfristig zur Verdunstung oder, verzögert, zum Abfluss beitragen.

Unterschiede von Modellen können anhand ihrer Struktur diskutiert werden. Die Struktur umfasst dabei zwei Modellaspekte, einerseits die Beschreibung der hydrologischen Prozesse, andererseits die Beschreibung des Raumes. Der Begriff „räumlich verteiltes Modell“ (spatially distributed model) hat an Bedeutung verloren, da heute praktisch alle Modelle die zu untersuchenden Einzugsgebiete räumlich auf Basis von Rastern oder Teilflächen abbilden. Nur so kann eine räumliche Verteilung von Parametern dargestellt werden. Innerhalb der kleinsten räumlichen Einheit kommt es jedoch noch zur pauschalen Zusammenfassung von Parametern (lumped parameters), die dann als Anteile an der Fläche angegeben werden. Auch die Bezeichnung „deterministisch“ kann nicht zur Unterscheidung von Modellen herangezogen werden. Zwar ist die zufallsbasierte Verteilung von Parametern auf Teilflächen eine sehr interessante Option, um natürliche Variabilität abzubilden, jedoch macht dies aus der häufig von Hand vorzunehmenden Modellkalibrierung ein aussichtsloses Unterfangen, da dann nicht mehr bekannt ist, ob eine Änderung Ergebnis zufälliger Modellparameter oder planmäßig geänderter Kalibrierparameter ist. Modellparameter beschreiben Flächeneigenschaften. Kalibrierparameter beeinflussen entweder Modellparameter, Gleichungen, oder

Eingangsdaten. Während alle Modelle deterministisch sind, können die Eingangsdaten durchaus stochastisch, also durch zufälliges Ziehen aus Verteilungen, gewonnen werden.

Wichtig ist die Modellstruktur hinsichtlich der Prozessbeschreibung. Wasserhaushaltsmodelle können von der Struktur her physikalisch, physikalisch basiert, oder konzeptionell sein. Physikalische Modelle lösen unter Erhalt der Massen- und Energiebilanz nichtlineare partielle Differentialgleichungen. Dies sind die Bewegungsgleichungen nach Navier-Stokes bzw. Saint Venant oder ihre Vereinfachungen wie die Flachwassergleichungen für Oberflächenabfluss, die Näherungslösung nach Boussinesq für die gesättigte Bodenzone und die Richards-Gleichung für die Sickerströmung in der ungesättigten Zone. Die Berechnung erfolgt auf einem zwei- oder dreidimensionalen Raster. Die Vorteile physikalischer Modelle sind geringer Aufwand bei Modellerstellung und Kalibrierung sowie ein gutes Extrapolationsverhalten. Auch eignen sich partielle Differentialgleichungen gut für die Parallelisierung auf Rechnern mit vielen Prozessoren. Dennoch bleibt ein hoher Rechenbedarf einer ihrer Hauptnachteile. Ein weiterer ist, dass das Berechnungsraster - derzeit üblich ist im besten Fall ein Quadratkilometer - bei der detaillierten Analyse nicht zum Gelände passt, da die Zellen des Rasters die Grenzen der Teileinzugsgebiete oder Teilflächen willkürlich schneiden.

Physikalisch basierte Modelle rechnen entweder auf Rastern oder auf Teilflächen, die aus der Topographie des Geländes abgeleitet sind und daher die Grenzen der Einzugsgebiete einhalten. Analog zu Parametrisierungen in Klimamodellen werden die hydrologischen Prozesse als funktionale Zusammenhänge in Abhängigkeit von Randgrößen und Modellparametern berechnet. Die Massenbilanz wird als Wasserbilanz weiter eingehalten, die Energiebilanz zumeist nicht. Die Modellparameter repräsentieren die stabilen Zustandsgrößen eines Einzugsgebiets, während Niederschlag und andere klimatische Eingangsgrößen die in der Zeit veränderlichen Randgrößen bilden (Merz et al., 2011). Aus der Existenz einer Messvorschrift für die Modellparameter wird die Bezeichnung „physikalisch basiert“ abgeleitet.

Das Problem physikalisch basierter Modellierung ist die Vielzahl der hierfür benötigten Parameter, deren willkürliche Schätzung für große Einzugsgebiete den physikalischen Ansatz in Frage stellt (Kreye et al., 2010). Auch bedeutet die Existenz einer Messvorschrift nicht, dass der auf der Punktskala prinzipiell messbare Wert dem für die Rasterzelle oder Teilfläche notwendigen effektiven Wert entspricht (Beven, 1989). Dennoch ist eine physikalische Interpretation des Modellparameters für die Modellkalibrierung hilfreich. Die Modellparameter werden für die großräumige Modellierung in der Regel ohne Felduntersuchungen mit pragmatischen Annahmen aus Bodenkarten, Gelände- und Höhenmodellen abgeleitet. Häufig ist es erforderlich, zur Begrenzung der Rechenzeit die detaillierten Angaben aus diesen Quellen zusammenzufassen. Die eigentlich mögliche Abbildung einer hohen räumlichen Variabilität wird damit rechentechnischen Erwägungen geopfert. Ein Beispiel hierfür wird in Abschnitt 7.1.6 ausgeführt.

Hydrologische Modelle werden nie in Gänze physikalisch betrieben. Der für die physikalische Modellierung am häufigsten gewählte Prozess ist die Versickerung, die in Abhängigkeit von Bodeneigenschaften für Hanglängsschnitte (Maurer, 1997) oder strukturierte Raster (Schulla, 1997, Asokan und Dutta, 2008) ein- oder mehrdimensional unter Verwendung der Gleichung nach Richards (1931) berechnet wird. Hohe Anforderungen an Eingangsdaten sowie der

hohe numerische Aufwand physikalischer Ansätze stehen aber häufig in ungünstigem Verhältnis zum Zugewinn an Modellaussage (Maurer, 1997).

Da bei physikalisch basierten Modellen die Vorstellung einer physikalischen Bedeutung des Modellparameters wichtiger ist als seine tatsächliche Existenz als Messwert, behalten konzeptionelle Modelle ihre Berechtigung. Auch sie weisen Modellparameter auf, allerdings fehlt diesen die physikalische Interpretation. Sie können als Abstraktion physikalisch basierter Modelle interpretiert werden.

Als effizienteste Modelle stellen sich häufig konzeptionelle Modelle heraus, die basierend auf klassischen empirischen Gleichungen Aussagen über den zeitlichen Verlauf hydrologischer Prozesse erlauben. In der Abflussbildung sind dies bezüglich der Verdunstung der Ansatz nach Thornthwaite (1948) und bezüglich der Versickerung das SCS-Verfahren des ehemaligen US-Soil-Conservation Service (USDA, 1986). Die Abflusskonzentration wird rein mathematisch als Einheitsganglinie (Sherman, 1932, Mockus, 1972) oder, physikalisch orientiert, als eine Kaskade linearer Speicher modelliert (Nash, 1957). Der Abfluss im Gewässer wird häufig über die Fließformel nach Gauckler-Manning-Strickler angenähert (Strickler, 1923). Alternative Verfahren sind die Anwendung der linearen Speicherkaskade nach Kalinin-Miljukov, das Muskingum-Verfahren oder als Vereinfachungen der Saint-Venant-Gleichungen die dynamische und kinematische Welle (Maniak, 2005). Ein Problem konzeptioneller Ansätze ist, dass ihre Anwendung häufig auf Tabellenwerken für Regelkurven beruht, beispielsweise den Bodenkurven des SCS-Verfahrens, die auf empirischen Untersuchungen beruhen. Diese sind streng genommen nur regional gültig. Eine Anpassung an andere Regionen würde die Wiederholung dieser Untersuchungen erfordern. Da dieser Aufwand nicht zu leisten ist, werden zusätzliche Kalibrierparameter eingeführt, was die Modellunsicherheit erhöht.

4.2 Gütemaße

Die durch Nash und Sutcliffe (1970) definierte Modelleffizienz, der empirische Korrelationskoeffizient r nach Pearson und die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (der RMSE) sind die am weitesten verbreiteten Gütemaße in der hydrologischen Modellierung. Sie wurden daher auch in dieser Arbeit verwendet.

Die Modelleffizienz E nach Nash und Sutcliffe berücksichtigt sowohl Volumen als auch Spitzenwerte einer Ganglinie über n Zeitschritte. Sie vergleicht den quadratischen Fehler einer Beobachtung Q_{obs} und Simulation Q_{sim} mit der Varianz der Messung:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} = 1 - \frac{\text{quadratischer Fehler}}{\text{Varianz}} \quad 2$$

$Q_{obs,i}$ ist der beobachtete Abfluss zum Zeitpunkt t , der Querstrich bezeichnet den Mittelwert der beobachteten Zeitreihe. Eine Effizienz von null zeigt an, dass die Modellrechnung so aussagefähig ist, wie der Mittelwert der Beobachtung ist. Eine Effizienz kleiner null deutet an, dass der beobachtete Mittelwert ein besserer Indikator als die Modellrechnung ist. Je näher

die Effizienz an eins liegt, umso besser ist das Modell. Da die Varianz einer Zeitreihe mit ihrer Länge steigt, dürfen eigentlich nur Zeitreihen gleicher Länge verglichen werden. Was ein akzeptabler Wert für die Effizienz ist, ist stark vom Einsatz abhängig. Bei der Kalibrierung des Talsperrenmodells wurden Effizienzen um 0,7 als sehr gut bewertet. In einem späteren Kapitel zur Optimierung erreicht ein Metamodell Werte über 0,9.

Der empirische Korrelationskoeffizient r ist ein Maß für die Stärke einer linearen Korrelation und bewegt sich zwischen -1 und 1. Dabei beschreibt 1 eine perfekte Korrelation, -1 eine perfekte invertierte Korrelation, wohingegen 0 das Fehlen jeglicher Korrelation anzeigt (Sachs, 2006). Der Korrelationskoeffizient ist ein gutes Maß für den relativen Verlauf zweier Ganglinien, jedoch berücksichtigt er in seiner Aussage weder Volumen noch Scheitelwerte.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})(Q_{sim,i} - \overline{Q_{sim}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \overline{Q_{sim}})^2}} = \frac{\text{Kovarianz}}{\text{Standardabweichungen}} \quad 3$$

Die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (root mean squared error, RMSE) schließlich ist das am einfachsten zu berechnende Gütemaß. Es soll möglichst gering sein. Da der RMSE nur die Differenzen des simulierten und beobachteten Abflusses betrachtet, diese aber bei großen Abflüssen naturgemäß einen größeren Betrag haben als bei kleinen Abflüssen, erhalten die Extremwerte ein hohes Gewicht. Er eignet sich daher besonders zur Bewertung der Extreme.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2} \quad 4$$

4.3 Skaleneffekte

Merz et al. (2009) untersuchten Skaleneffekte in der konzeptionellen hydrologischen Modellierung. Hierfür wendeten sie ein konzeptionelles Niederschlag-Abfluss-Modell, das stark an das HBV-Modell (Bergström, 1992) angelehnt ist, auf 269 Einzugsgebiete mit Größen zwischen 10 und 130 000 km² in Österreich an. Da das Modell nur 11 Parameter benötigt, eignet es sich besonders für diese Aufgabenstellung. Im Rahmen einer Autokalibrierung maximierten sie die Modelleffizienz nach Nash und Sutcliffe (1970) mittels des genetischen Algorithmus' SCE UA (Duan et al., 1992).

Im Rahmen eines Teilprobenvergleichs (split sample test) nach Klemeš (1986) verglichen sie simulierten und beobachteten Abfluss anhand der Modelleffizienz. Grundsätzlich konnten sie die Annahme bestätigen, dass eine gute Modell-Effizienz bei der Kalibrierung zu einer guten Modelleffizienz bei der Validierung, also der Modellanwendung auf einen bei der Kalibrierung nicht verwendeten Zeitraum, führt.

Sie stellten weiterhin fest, dass die Modellgüte im Bereich zwischen 10 und 10 000 km² mit der Einzugsgebietsgröße steigt. Sie führen dies einerseits auf die steigende Anzahl von verfügbaren Beobachtungsstationen zurück. Andererseits gleicht sich mit steigender Einzugsgebietsgröße auch ein größerer Anteil der kleinräumigen Variabilität aus. Weiterhin ist mög-

lich, dass große Einzugsgebiete einen geschlossenen Wasserhaushalt aufweisen, in welchem die Tiefenversickerung oder andere Verluste unbedeutend werden.

Die Ergebnisse bestätigen die Erfahrung, dass große Einzugsgebiete einfacher zu modellieren sind als kleine.

Eine Teiluntersuchung befasste sich mit dem Einfluss der für die Kalibrierung verwendeten Zeitreihenlänge auf die Modell-Effizienz. Mit Zeitreihenlängen zwischen fünf und 30 Jahren aus dem Zeitraum 1976 bis 2005 modellierten Merz et al. (2009) den Wasserhaushalt der 269 Einzugsgebiete in Österreich. In der Kalibrierung sank die Modelleffizienz erwartungsgemäß mit steigender Zeitreihenlänge: Je länger die Zeitreihe, umso größer ist die Variabilität der in ihr enthaltenen hydrologischen Situationen und umso schwieriger wird es, diese mit einem konstanten Parametersatz abzubilden.

Umgekehrt verhielt sich die Modelleffizienz bei der Validierung: Je länger die für die Kalibrierung verwendete Zeitreihe, umso höher ist die Effizienz des jeweiligen Modells bei der Validierung. Der aus einem längeren Kalibrierungszeitraum erhaltene allgemeingültigere Parametersatz erlaubt eine bessere Modellierung unterschiedlicher hydrologischer Zustände, vielleicht sogar solcher, die während des Kalibrierungszeitraums gar nicht beobachtet wurden.

Zusammenfassend führt ein kürzerer Zeitraum zu einer höheren Modelleffizienz bei der Kalibrierung, birgt aber das Risiko einer schlechteren Modellgüte bei der Prognose. Für Zeiträume zwischen ein und fünf Jahren ist sowohl der Verlust an Kalibrierungseffizienz als auch der Gewinn an Validierungseffizienz am größten. Daraus folgern Merz et al. (2009), dass ein Kalibrierungszeitraum von fünf Jahren einen Großteil der zeitlichen hydrologischen Variabilität erfasst und damit das Minimum für eine angemessene Prognosefähigkeit des Modells darstellt. Längere Zeitreihen verbessern das Ergebnis nur mäßig. Für einen fünfzehnjährigen Kalibrierungszeitraum gleicht sich die durchschnittliche Validierungseffizienz der Kalibrierungseffizienz an, wobei die Effizienz der Validierung in der Regel hinter der der Kalibrierung zurück bleibt. Folglich ist die hydrologische Variabilität in Österreich in einem Zeitraum von 15 Jahren erschöpfend beobachtet.

Für die Klimafolgenmodellierung werden Perioden einer Länge von 30 Jahren verglichen, da Klima das für einen relativ großen Zeitraum (World Meteorological Organization: 30 Jahre) charakteristische statistische Verhalten der Atmosphäre ist (Hantel et al., 1987). Dem vergangenen Zeitraum 1971-2000 wird als nahe Zukunft der Zeitraum 2021-2050 und als ferne Zukunft der Zeitraum 2071-2100 gegenüber gestellt. Die Verwendung einer Zeitreihe von 30 Jahren für die Kalibrierung führt unter der Voraussetzung zeitstabiler Modellparameter zu einem sehr prognosefähigen Modell.

4.4 Zeitstabilität von Modellparametern

Mit Blick auf die Verwendung von konzeptionellen Modellen in der Klimafolgenforschung widmeten Merz et al. (2011) der Zeitstabilität von Modellparametern eine weitere Untersuchung. Dafür verglichen sie an sechs Fünfjahreszeiträumen zwischen 1976 und 2006 kalibrierte Modelle für 273 Einzugsgebiete in Österreich.

Österreich zeigt ein starkes Klimawandelsignal mit einem mittleren Temperaturanstieg von zwei Grad Celsius in der genannten Periode. Vergleiche unterschiedlicher Regionen und unabhängiger Datensätzen sowie Analysen der räumlichen Variabilität der Modellparameter erlaubten den Autoren, Trends in den Modellparametern mit Klimaänderungsindikatoren wie Temperatur und potentieller Verdunstung zu korrelieren. Sie fanden heraus, dass insbesondere die Parameter des Schnee- und des Bodenfeuchtemoduls echte Klimasensitivität zeigten und damit nicht zeitstabil waren. Ersteres, weil in wärmeren Jahren mehr Regen-auf-Schnee-Ereignisse eintreten, letzteres, weil in einem wärmeren Klima die Böden infolge erhöhter Verdunstung tendenziell trockener sind und die Vegetationsperioden sich verlängern. Diese Beobachtungen zeigen in die gleiche Richtung wie die Ergebnisse von Bergström et al. (2001), die ebenfalls Schnee und Verdunstung als die kritischen Module in der Wasserhaushaltsmodellierung mit HBV in Bezug auf Klimawandel sehen. Bergström et al. (2001) diskutieren insbesondere die Eignung von Temperaturindex-Verfahren wie das nach Thornthwaite (1948) für die Simulation des Klimawandels. Die Parameter des Routing-Moduls stellten sich nach Merz et al. (2011) hingegen als zeitstabil heraus.

Mit Beispielrechnungen zeigen Merz et al. (2011), dass die Annahme zeitstabiler Modellparameter zu großen Prognosefehlern führen kann. Ein an der Periode 1976-1981 kalibrierter Parametersatz erzeugte, angewendet auf die Periode 2001-2006, eine Erhöhung des Mittelwasserabflusses um 15% und des Hochwasserabflusses um 35%. Die Beobachtung zeigte hingegen, dass die Abflüsse im Vergleich der beiden Perioden ziemlich konstant geblieben waren, da die Zunahme des Niederschlags durch eine Zunahme der Verdunstung kompensiert wurde. Die durch zeitstabile Parameter hervorgerufenen Fehleinschätzungen beruhen auf verallgemeinernden Annahmen in den konzeptionellen Ansätzen. Die Modellstruktur kann jedoch so verändert werden, dass die Teilprozesse, die die Fehleinschätzungen hervorrufen, in den konzeptionellen Ansätzen explizit berücksichtigt werden.

4.5 Internationaler Überblick

4.5.1 Asien

4.5.1.1 Analyse zukünftiger Wasserressourcen in Indien

Asokan und Dutta (2008) untersuchten das 141 000 km² große Mahanadi-Einzugsgebiet in Indien bezüglich Verfügbarkeit von Wasserressourcen für landwirtschaftlichen, privaten und industriellen Bedarf unter möglichen zukünftigen Klimaverhältnissen. Der Hirakud-Damm mit einem Speicherraum von 7 189 Mio m³ ist der größte Speicher im Untersuchungsgebiet. Sie nutzten Beobachtungsdaten von 6 Niederschlagsstationen und die Thiessen-Polygon-Methode, um den Niederschlag aus vier Gitterzellen des Kanadischen CGCM2 (Flato et al., 2000) auf das Einzugsgebiet herunter zu skalieren. Die Rechnungen im teilweise physikalischen, teilweise physikalisch basierten hydrologischen Modell IISDHM (Dutta et al., 2000) erfolgten jeweils für den feuchtesten Monat September und den trockensten Monat April der Jahre 2000, 2025, 2050, 2075 und 2100, also für Monatsperioden. Die Abschätzung der zukünftigen Wasserverfügbarkeit erfolgte durch den Vergleich des Monats September oder des Monats April in den fünf untersuchten Jahren. Die Interzeption wird in IISDHM über den

Blattflächenindex, die Verdunstung nach Kristensen und Jensen (1975) abgebildet. Auf einem Raster mit einer Zellengröße von 1 km² löst das Modell im Zeitschritt von einer Stunde die Saint-Venant-Gleichung für den Gerinneabfluss und die Flachwassergleichungen für den Oberflächenabfluss. Die Versickerung wird in der ungesättigten Zone mit der dreidimensionalen Form der Richards-Gleichung und in der gesättigten Zone mit der zweidimensionalen Boussinesq-Gleichung berechnet. Die Berechnung von Gerinne- und Oberflächenabfluss mit der Kinematischen Welle erlaubte angesichts der Größe des Einzugsgebiets eine deutliche Verringerung der Rechenzeit. Der Rauheitsbeiwert nach Gauckler-Manning-Strickler war der wichtigste Parameter bei der Kalibrierung.

Die Abschätzung des gegenwärtigen Wasserbedarfs erfolgte im landwirtschaftlichen Bereich über die bewässerte Fläche, die Bewässerungseffizienz, den Niederschlag und die Verdunstung. 90 % des Wasserbedarfs entstehen in der Bewässerungslandwirtschaft. Ihr Bedarf wird im Mahanadi-Einzugsgebiet stetig steigen und erhöht sich von 10 Mrd m³/a im Jahr 2000 auf 75 Mrd m³ im Jahr 2100.

Der zukünftige private Wasserbedarf wurde auf der Grundlage unterschiedlicher Bevölkerungsprognosen abgeschätzt. Insgesamt steigt die Bevölkerung nach der gewählten Projektion im Zeitraum 2011-2041 von 27 auf 43 Mio Einwohner, um ab 2051 bis 2100 bei leicht über 50 Mio Einwohnern zu verharren. Der private Wasserbedarf steigt auf Grundlage dieser Projektion von 600 Mio m³/a im Jahr 2000 auf rund 3 000 Mio m³/a im Jahr 2100.

Die Aktivität (siehe Abschnitt 6.4) diente neben der Anzahl der Beschäftigten und der Wertschöpfung der Abschätzung des Wasserbedarfs im industriellen Bereich. Dazu wurde die von 1981 bis 2001 beobachtete Wachstumsrate fortgeschrieben. Danach erhöht sich der industrielle Wasserbedarf vergleichsweise leicht von 228 Mio m³/a in 2000 auf 245 Mio m³/a im Jahr 2100.

Nach den gewählten Klimaprojektionen entwickelt sich im vorherrschenden Monsunklima der September zu einem Monat zunehmenden Wasserüberschusses (Verfügbarkeit abzüglich Bedarf). Die Anzahl großer Hochwässer steigt. Im April wird dagegen die Wasserknappheit deutlich zunehmen. Im Jahr 2100 liegt die projizierte Pro-Kopf-Wasserverfügbarkeit im April zwischen 0,16 und 4,41 Litern pro Tag. Dies ist nur ein kleiner Bruchteil des von der WHO empfohlenen Mindeststandards, der, auch zur Sicherstellung einer angemessenen Abwasserbehandlung, 70 Liter pro Kopf und Tag beträgt. Der Mindeststandard wird sich nur durch eine Erhöhung der Wasserspeicherung im September, also einen deutlichen Ausbau großer Speicher, annähernd decken lassen.

4.5.1.2 Optimierung von Betriebsregeln mit einem integrierten Speicherbewirtschaftungssystem in Korea

Eum et al. (2012) untersuchten mit einem integrierten Speicherbewirtschaftungssystem die Anpassungsmöglichkeiten an den Klimawandel im 23 817 km² großen Einzugsgebiet des Nakdong, Süd-Korea. Sieben Speicher produzieren dort jährlich 466,7 GWh Energie und drei Mrd m³ Trinkwasser. Der Andong-Speicher ist mit einem Stauraum von 1,2 Mrd m³ der größte, gefolgt von Hapcheon (S 790 Mio m³) und Imha (S 595 Mio m³). Diese drei Speicher stellen über 80% des Stauraums, sowie der Energie- und Wasserversorgung. Sie wurden im Rahmen der Studie untersucht. Vier weitere Speicher haben Stauräume zwischen 74 und

309 Mio m³. Innerhalb der letzten 10 Jahre haben die meisten Städte im Einzugsgebiet mehrfach unter trockenheitsbedingten Beschränkungen der Wasserversorgung gelitten. Wegen des vorherrschenden Monsun-Klimas fallen 58% des Jahresniederschlags während der Hochwassersaison zwischen Juli und September. Eine effiziente Wasserbewirtschaftung ist daher für den Hochwasserschutz ebenso wichtig wie für die Wasserversorgung.

Aus fünf Globalmodellen, darunter auch dem Hamburger ECHAM, wurden Monatswerte von Niederschlag und Temperatur der Zeitreihe 1980 bis 2059 und das Emissionsszenario B1 extrahiert. Die in den Globalmodellen beobachteten Veränderungen wurden statistisch auf Beobachtungsdaten von 17 in der Studie verwendeten Klimastationen herunterskaliert. Zeigte ein Globalmodell beispielsweise einen 10%igen Temperaturanstieg, wurde diese Rate auf die Beobachtungsdaten übertragen. So modifiziert, bildeten die Daten den Eingang für zwei Wettergeneratoren (Sharif und Burn, 2006, Eum et al., 2009). Diese waren zuvor so kalibriert worden, dass sie denselben Bereich von Extremwerten aufwiesen wie die unveränderten Beobachtungsdaten. Mit dieser Form des statistischen Downscalings wurden Zeitreihen auf Tagesbasis erzeugt und in die Perioden 1980-2008 und 2010-2049 unterteilt, um die Veränderungen von Temperatur und Niederschlag zwischen Gegenwart und Zukunft zu ermitteln. Die Änderung des Niederschlags pro Monat lag je nach Globalmodell zwischen -2 und +4 mm/d, ECHAM lag bei 0,8 mm/d. Die durchschnittliche monatliche Temperaturänderung betrug 0,39 bis 1,66 °C, ECHAM lag bei 0,64 °C. Die Ergebnisse der Modelle mit der höchsten Änderung wurden als trockenes und nasses Zukunftsszenario näher untersucht und von den 17 Beobachtungsstationen auf das Untersuchungsgebiet interpoliert. Zeitreihen von Temperatur und Niederschlag auf Tagesbasis für beide Perioden bildeten die Eingangsdaten für das Modell „Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation“ (SSAR) (USACE, 1987), das für viele Einzugsgebiete in Süd-Korea vorliegt.

SSAR besteht aus einem Wasserhaushaltsmodell sowie einem Routing- und Speicherbetriebsmodell. Nur mit Tageswerten von Niederschlag und Temperatur als Eingang modelliert das Wasserhaushaltsmodell Schneeakkumulation und Schneeschmelze nach Anderson (1973). Algorithmen berücksichtigen Interzeption, Verdunstung nach Thornthwaite (1948), Bodenfeuchte, Infiltration und Abflusskonzentration in einfachen konzeptionellen Ansätzen. Das Routing erfolgt mittels einer Kaskade von Reservoirs, auf der Grundlage der Speicher Gleichung erweitert um einen Speicherterm nach Wilson (1941). Die Abgabe aus Speichern kann als Funktion des Wasserstands angegeben werden. Auch Verzweigungen können im Modell abgebildet werden.

Eum et al. (2012) formulierten eine Zielfunktion für ihr Optimierungsmodell, die Wassermangel und Speicherüberlauf minimiert und die Energieproduktion maximiert. Dabei erhielt die Wasserversorgung das größte Gewicht. Minimaler und maximaler Speicherinhalt, notwendige und maximale sowie begrenzte Abgabe während der Entleerungszeit wurden über Randbedingungen vorgegeben.

Oberer und unterer Zielspeicherinhalts am Monatsende bildeten zwei Sätze monatlicher Betriebsregeln. Die obere Betriebsregel berücksichtigt den Hochwasserschutz, die untere die Wasserversorgung.

Diese Entscheidungsvariablen bildeten den Eingang für einen evolutionären Algorithmus, der mit den auf Monatswerte aggregierten Ergebnissen des Wasserhaushaltsmodells in einem

einfachen Metamodell die Betriebsregeln für die Zukunftsszenarien optimierte. Evolutionäre Algorithmen verwenden nach Eum et al. (2012) als primären Suchalgorithmus die Mutation, während genetische Algorithmen als primären Suchalgorithmus die Kreuzung verwenden. Genetische Algorithmen werden im Kapitel 5, welches sich mit der Optimierung von Talsperrenverbundsystemen befasst, näher erläutert.

Sowohl für die (beinahe) 30-jährige Zeitreihe 1980-2008 als auch die 30-jährige Zeitreihe 2010-2039 wurden die Betriebsregeln optimiert, die Jahre 2040 bis 2049 dienten einer Sensitivitätsanalyse. Die mit den Klimawandel-Szenarien optimierten Betriebsregeln für den (größten) Andong-Speicher zeigen kaum eine Veränderung gegenüber denjenigen Betriebsregeln, die mit den historischen Wettergenerator-Daten optimiert wurden. Der Speicherraum des Andong ist groß genug, um die durch den Klimawandel erzeugte Variabilität auszugleichen. Bei den kleineren Speichern Imha und Hapcheon werden vor allem die monatlichen Zielspeichereinhalte der unteren Betriebsregel nach oben verschoben, die Abgaben also verringert. Die Monatswerte der oberen Betriebsregel hingegen sinken insbesondere während der Regenzeit, um ein Überlaufen der Speicher zu verhindern. Kleine Speicher sind gegenüber dem Klimawandel sensibler als große, ihre Leistungsfähigkeit sinkt.

4.5.2 Amerika

Rajagopalan et al. (2009) untersuchten die Wasserversorgung aus den Speichern im Colorado (Mexiko) für die Periode 2008-2057 unter einer Reihe von Annahmen zu Bedarfszunahmen, Betriebsalternativen und Klimawandel auf der Grundlage stochastischer Zeitreihengeneration mit einem Ensemble von 10 000 Zeitreihen und einem sehr einfachen, nicht räumlich verteilten Bilanzmodell auf Monatsbasis (Barnett und Pierce, 2009). Sie fanden heraus, dass die Wahrscheinlichkeit des Speicherleerlaufs aufgrund von Bedarfszunahmen sehr gering ist, ein 20%iger Rückgang des jährlichen Abflusses im Colorado das Leerlaufisiko jedoch verzehnfacht. Sie entwarfen Betriebsregeln, die das Leerlaufisiko vermindert.

Vicuña et al. (2011) untersuchten den Einfluss des Klimawandels auf zwei hochgelegene Speicher in nivalem Abflussregime in Kalifornien mit Eingangsdaten aus dem großskaligen, physikalisch basierten „variable infiltration capacity“ (VIC) Modell, das sowohl die Massen- als auch die Energiebilanz erhält. Als Grundlage dienten Eingangsdaten aus 6 Globalmodellen für die Emissionsszenarien A2 und B1, die biaskorrigiert und mit einem statistischen Verfahren nach Maurer und Hidalgo (2008) herunterskaliert worden waren. Sie entwarfen ein Optimierungsmodell, welches den Speicherbetrieb auf der Grundlage von Zuflussganglinien auf Monatsbasis simuliert und mittels sequentiell linearen Programmieren hinsichtlich der Energieerzeugung optimiert. Für die Berechnung der Erlöse zogen sie variable Preise einer Strombörse heran. Geringere Schneedeckenbildung und eine Verkürzung der Schneeschmelze führen zu höheren Abflüssen zwischen Dezember und März sowie niedrigeren Abflüssen im Sommer für die Zeitreihe 2070-2099. Die Leistungsfähigkeit der beiden Speicher geht nur leicht zurück, die Änderungen im Abfluss sind größer als die Änderungen in der Energieerzeugung. Deutliche höhere Abflussspitzen erhöhen die Hochwassergefahr insbesondere für die Stadt Sacramento.

Fleming und Weber (2012) untersuchten mit statistischen Modellen den langfristigen Trend in historischen Zuflussserien zu Wasserkraft-Speichern in Kanada und fanden häufig steigende Trends in den Winterzuflüssen.

4.5.2.1 Bewertung des Speicherbetriebsrisikos unter Einfluss des Klimawandels in Kalifornien, USA

Brekke et al. (2009) analysierten das Speicherbetriebsrisiko unter Einfluss des Klimawandels auf Speicher in neun, hoch gelegenen Einzugsgebieten des Central Valley- und des State Water Projects in Kalifornien. Betriebsrisiko im Sinne dieser Studie ist der Bereich möglicher zukünftiger Änderung der Speicherbetriebsleistung im Vergleich zur Vergangenheit.

Es wurden konkurrierende Ziele in den wichtigsten Speichern Lake Oroville ($S = 4,36 \text{ Mrd m}^3$) und Lake Shasta ($S = 5,6 \text{ Mrd m}^3$) untersucht: einerseits die mittlere jährliche Wasserlieferung und andererseits der mittlere Stauinhalt am Ende des Septembers als Verbesserung des Schutzes gegen Trockenzeiten. Beide Maßzahlen sollten möglichst groß sein. Damit stand die Leistungsfähigkeit des Systems unter trockenen Verhältnisse auf dem Prüfstand. Des Weiteren wurde eine Änderung der Hochwassergefährdung in Form des maximalen Dreitagesvolumens des Abflusses einer 30-jährigen Zeitreihe berücksichtigt. Auch der Betrieb der Systeme mit geänderter Betriebsregel war Gegenstand der Untersuchung.

Für den Vergleich der Klimaszenarien A2 und B1 mit der Vergangenheit werteten die Autoren die Modellergebnisse aus 22 IPCC-Globalmodellen mit und ohne Wichtung der Ensemblemitglieder aus. Sie bildeten ein großes Modellensemble aus 75 Projektionen zur Abschätzung der Unsicherheit und ein kleineres zur Berechnung der Auswirkungen. Die Wichtung der Ensemblemitglieder erfolgte auf der Grundlage einer bivariaten Verteilung der Zukunftsprojektionen hinsichtlich Temperatur und Niederschlag und der Lage der jeweiligen Projektion in dieser Verteilung. Ensemblemitglieder, die näher am Median lagen, erhielten ein stärkeres Gewicht.

Für Kalifornien ist die Betrachtung von Ensembles von besonderer Bedeutung, da dort die Klimamodelle zwar eine gewisse Übereinstimmung bezüglich der Erwärmung, aber kaum bezüglich der Niederschlagsentwicklung zeigen. Die Zukunftsperioden 2011–2040 und 2041–2070 zeigen im Vergleich zur Periode 1950–1999 eine Erwärmung um ca. 1°C und ca. 2°C . Eine Veränderung des Niederschlags wird kaum festgestellt, es gibt aber eine Verschiebung des Unsicherheitsbandes in Richtung trockenerer Verhältnisse.

Die Autoren generierten in einem statistischen Downscaling-Prozess Wettersequenzen im Sechs-Stunden-Zeitschritt auf der Grundlage von Änderungen der monatlichen Klimatologie (Maurer, 2007) und modellierten die Reaktion des Abflusses auf den Klimawandel im konzeptionellen Sacramento Soil Moisture Accounting (SacSMA) Model (Burnash et al., 1973), gekoppelt mit dem Schnee-Modell nach Anderson (1973).

Die Ergebnisse aus der hydrologischen Modellierung dienten zur Simulation des Speicherbetriebs in CalSim II (Draper et al., 2004), einem Optimierungssystem, das auf der Basis gemischt-ganzzahliger linearer Programmierung wahlweise auf Tages- oder Monatsbasis Abgaben entsprechend den Nutzungsanforderungen optimiert.

Brekke et al. (2009) konnten zeigen, dass der Gebietsabfluss von Spätherbst bis in den Frühling hinein, also in der traditionell nassen Saison, zunimmt, und ab Mitte Frühling bis zum Sommer abnimmt. Im September und Oktober fanden sie kaum Veränderungen. Dies führten sie vor allem auf verringerten Schneefall und geringere Schneedeckenbildung sowie erhöhten Regenanteil am Niederschlag zurück. Erwartungsgemäß weisen die Ergebnisse eine hohe Bandbreite auf.

Für das Middle Fork Feather Basin zeigt eine Mehrheit der Ensemblemitglieder eine Zunahme des Medians des maximalen Dreitagesvolumens zwischen November und März, wobei die Zunahme für die Periode 2011-2040 rund 45% beträgt, in der Periode 2041–2070 hingegen auf 32% zurückgeht. Umgekehrt verhält es sich in diesem Teileinzugsgebiet im März: Hier sieht eine schwache Mehrheit der Ensemblemitglieder den Median des maximalen Dreitagesvolumens in der Periode 2011-2040 um 18% ansteigen, gefolgt von einer weiteren Zunahme auf 36% in der Periode 2041–2070. Die Spannweite aller Ensemblemitglieder beträgt das Drei- bis Fünffache des Medians. Andere Teileinzugsgebiete zeigen ein ähnliches Verhalten, die Variabilität ist jedoch groß.

Neben des Einflusses der Wichtung der Ensemblemitglieder wurde auch der Einfluss einer Änderung der Betriebsregel untersucht. Durch die Kombination ergaben sich insgesamt vier Untersuchungsvarianten.

Nach der geänderten Betriebsregel wird der Hochwasserschutzraum zwischen November und März um 10% vergrößert, der Speicherinhalt also verringert, ohne dass von einer früheren Auffüllung im Frühling ausgegangen wird. Die mittlere jährliche Wasserbereitstellung aus dem Central Valley Project ändert sich mit Wichtung der Ensemblemitglieder und ohne Änderung der Betriebsregel in trockenen Jahren um ungefähr -25 bis +15% für den Zeitraum 2041–2070. Mit Wichtung der Ensemblemitglieder und geänderter Betriebsregel beträgt die Änderung -25 bis +10%. Das Speichervermögen der Reservoirs mindert den Einfluss der monatlichen Abflussänderungen auf die jährliche Wasserlieferung. Das Risiko eines Sinkens der Zuflüsse im Frühling ist größer als das Risiko eines Steigens oder Sinkens der jährlichen Liefermenge. Weiterhin reagiert der Speicherbetrieb sensibler auf eine Änderung des Jahresniederschlags als auf eine Änderung der Temperatur.

Ohne Wichtung der Ensemblemitglieder ist die Wahrscheinlichkeit extremer Abnahmen sowohl der mittleren jährlichen Liefermenge als auch des Stauinhalts am Ende des Septembers größer. Der Einfluss der geänderten Betriebsregel überwiegt den Einfluss der Wichtung der Ensemblemitglieder jedoch deutlich: Die maximalen Abnahmen des Stauinhalts am Ende des Septembers liegen im Lake Shasta aufgrund der Wichtung bei -21 bis -12%, aufgrund geänderter Betriebsregel hingegen bei -51 bis -42%.

Der Stauinhalt am Ende des Septembers reagiert stärker als die mittlere jährliche Wasserbereitstellung, ist also das sensitivere Ziel in dieser Untersuchung. Die Änderung der Betriebsregel beeinflusst das Ergebnis wesentlich stärker als eine Wichtung der Ensemblemitglieder.

4.5.2.2 Analyse zukünftiger Wasserressourcen in Nordost-Brasilien.

Krol et al. (2011) untersuchten den Einfluss kleiner Speicher auf die großräumige Wasserverfügbarkeit im 933 km² großen Einzugsgebiet des Benguê in Nordost-Brasilien. Sie verwendeten direkt globale Zirkulationsmodelle ohne Downscaling und wählten geeignete Modelle anhand ihres Vermögens aus, regionale Niederschlagsmuster im Nordosten Brasiliens zutreffend wiederzugeben. Von 27 Klimamodellen aus dem dritten und vierten Sachstandsbericht des Weltklimarates zeigen nur fünf ein hinreichendes Vermögen, die Saisonalität des Niederschlags wiederzugeben. Diese Modelle wiesen jedoch ein relativ mäßiges Änderungssignal des Niederschlags von -8 bis +6% für das Jahr 2100 auf. Aus diesen Prognosen leiteten die Autoren Klimawandelannahmen wie beispielsweise „Anstieg der potentiellen Verdunstung um 15%“ ab und untersuchten die Auswirkungen dieser Annahmen ausgehend von der Zeitreihe 2000 – 2005. Hierfür verwendeten Sie das für großskalige Anwendung in semi-ariden Gebieten entwickelten Wasserhaushaltsmodell WASA (Güntner, 2002), das für den 148 000 km² großen Bundesstaat Ceará zur Verfügung steht (Güntner et al., 2004).

WASA (Water Availability in Semi-Arid Environments) ist ein konzeptionelles Wasserhaushaltsmodell, das in der Regel im Tagesschritt rechnet. Eine Besonderheit ist das hierarchische Konzept, das in fünf Stufen vom Teileinzugsgebiet bis zum repräsentativen Bodenprofil die kleinräumige Heterogenität der großskaligen Modellierung zugänglich macht (Güntner und Bronstert, 2004). „In Abhängigkeit von der Auflösung der verfügbaren Daten wird die kleinste Variabilität nicht räumlich explizit, sondern über die Verteilung von Flächenanteilen subskaliger Einheiten und über statistische Übergangshäufigkeiten für laterale Flüsse zwischen den Einheiten berücksichtigt“ (Güntner, 2002, IXX). WASA parametrisiert klassische Prozessbeschreibungen aus physiografischen Daten und benötigt daher keine Kalibrierung. Die Vegetationsdauer wird abhängig von der Regenzeit berechnet. Anfang und Ende werden aus einer statistisch signifikanten Trendänderung in der Niederschlagszeitreihe abgeleitet. Die Interzeption wird mit Hilfe des Blattflächenindex berechnet, die Verdunstung beruht auf einem vereinfachten Penman-Montheith-Ansatz. Die Infiltration verwendet den Ansatz nach Green und Ampt (1911), modifiziert nach Schulla (1997). Ein mehrschichtiges Bodenmodell berücksichtigt laterale Flüsse und Perkolation, nicht hingegen kapillaren Aufstieg. Kleine und mittlere Speicher, die zu mehreren tausend im Einzugsgebiet vorhanden sind, werden in fünf unterschiedliche Größenklassen zusammengefasst, die Wasserbilanz großer Speicher ($S > 50 \text{ Mio m}^3$) wird explizit berechnet. Das Routing basiert auf einer Dreiecksfunktion auf Tagesbasis, die abhängig von Fließzeit und Retentionszeit parametrisiert wird (Güntner, 2002).

Das gekoppelte Speicherbewirtschaftungsmodell SIM (Krol et al., 2001) berücksichtigt den Wasserbedarf, unterschieden nach Bewässerung, Viehzucht, privater und industrieller sowie touristischer Wassernutzung.

Krol et al. (2011) konnten zeigen, dass die Wasserversorgung aus kleinen Speichern einerseits empfindlicher auf den angenommenen Klimawandel reagiert als diejenige aus großen Speichern, andererseits aber die kleinen Speicher die Leistungsfähigkeit großer Speicher deutlich verringern.

4.5.3 Projekte in Deutschland und angrenzenden Ländern

Deutsche Beispiele für die Anwendung von Wasserhaushaltsmodellen zur Simulation des Einflusses von Klimaänderungen auf Speichersysteme sind bisher selten. Müller und Lennartz (2011) arbeiten im Rahmen des noch laufenden Forschungsprojektes REGKLAM an der multikriteriellen Optimierung der Talsperren Lehmühle und Klingenberg im Erzgebirge. Im Rahmen des in der Endphase befindlichen Forschungsprojektes AMICE wird das Einzugsgebiet der Maas untersucht: Die neun Talsperren im Einzugsgebiet der Rur, einem rechten Nebenfluss der Maas, werden mit dem physikalisch basierten Wasserhaushaltsmodell NASIM (Hydrotec, 2003) und dem Talsperren-Optimierungsmodell TALSIM (Lohr, 2001) modelliert. Angetrieben wird die Modellkette durch das DWD-Produkt ZWEK, in dem Daten aus den dynamischen Modellen CLM (Böhm et al., 2006) und REMO (Jacob et al., 2008) sowie den statistischen Modellen WETTREG (Spekat et al., 2007) und STAR (Werner und Gersengarbe, 1997) für die regionale Klimafolgenforschung aufbereitet werden (Kufeld et al., 2012 und mündliche Mitteilung).

Wagner et al. (2009) analysierten den Einfluss des Klimawandels für das Emissionsszenario A2 und die Zeitreihe 2002–2053 auf drei große Talsperren im Einzugsgebiet der tschechischen Elbe. Eingangsdaten aus dem statistischen Regionalmodell STAR wurden im Wasserhaushaltsmodell LISFLOOD (Van der Knijff und De Roo, 2007, Van der Knijff et al., 2010) verarbeitet. LISFLOOD wurde für die Simulation großer Flussgebiete entwickelt und simuliert hydrologische Prozesse auf einem strukturierten Raster üblicher Weise auf Tagesbasis. Die Auflösung des Rasters kann zwischen 1 km² und 10 000 km² liegen. Die potentielle Verdunstung wird extern in einer separaten Routine in einem an Penman-Monteith (Monteith, 1965) angelehnten Ansatz berechnet. Die Abbildung der Interzeption erfolgt auf Basis des Blattflächenindex. Für die Schneeschmelze ist ein einfaches Grad-Tag-Verfahren implementiert. Die Infiltration wird durch Anwendung der ARNO-Methode (Todini, 1996) ermittelt. Das Routing erfolgt auf Basis der kinematischen Welle. Wagner et al. (2009) erweiterten LISFLOOD um ein detailliertes Talsperrenmodul und stellten fest, dass unter den von STAR erzeugten Klimaprojektionen die Hochwasser selten den schadlosen Abfluss an den Talsperren übersteigen und eine Reduktion des Scheitels nur in wenigen Fällen notwendig ist. Daher bewirkten verschiedene untersuchte Talsperrensteuerungen nur geringe Änderungen des zukünftigen Hochwasserregimes.

Die Versorgungssicherheit des Ruhrtalsperrensystems war Gegenstand der Untersuchung von Morgenschweis et al. (2008). Da eine Betrachtung auf Monatsbasis durch die Mittelung des Abflusses die Kapazität der Talsperren überschätzt, generierten sie Tageswerte von Niederschlag, Temperatur und Luftfeuchte mit einem Wettergenerator (Buishand und Brandsma, 2001) für 4 000 Jahre auf Grundlage der Zeitreihe 1961–1995. Das Ruhreinzugsgebiet ist in 51 Teileinzugsgebieten im physikalisch basierten Wasserhaushaltsmodell „Precipitation Runoff Modelling System“ (PRMS) (Markstrom et al., 2008) abgebildet. Teileinzugsgebiete werden in Teilflächen und Hydrotöpfe gegliedert. Die Verdunstung kann nach Hamon (1961) oder Jensen et al. (1969) ermittelt werden. Die Interzeption wird in Abhängigkeit von Bewuchsdichte und Blattflächenspeicher berechnet. Eine vereinfachte Form des Schneemodells nach Anderson (1973) ist implementiert. Das Routing wird durch eine lineare Speicherkaskade abgebildet. Die Ergebnisse des Wasserhaushaltsmodells gehen in ein Echtzeit-Betriebssystem ein, welches die Steuerung des Talsperrenbetriebs ermöglicht.

Morgenschweis et al. (2006) überprägten die synthetischen Zeitreihen mit dem Klimaänderungssignal aus WETTREG und REMO für das Emissionsszenario A1B anhand statistischer Kenngrößen, die aus dem Vergleich des Zeitraums 1961-1995 und 2071-2100 abgeleitet wurden. Für vier Klimaänderungsszenarios untersuchten sie die Auswirkung des Klimawandels auf den Talsperrenbetrieb und stellten fest, dass sich bei unveränderter Entnahme die Ausfallwahrscheinlichkeit des Ruhrtalsperrensystems hinsichtlich der Wasserversorgung bei drei von vier Szenarios im Vergleich zur Vergangenheit mehr als verdoppelt. Als wahrscheinlichstes Szenario gilt eine Erhöhung der Versagenswahrscheinlichkeit hinsichtlich Trinkwasserversorgung von 2‰ (einmal in 500 Jahren) auf 5‰ (einmal in 200 Jahren).

4.6 Diskussion

Wie die in der Literaturstudie angeführten Fallbeispiele zeigen, sind Wasserhaushaltsmodelle in der Simulation des Einflusses von Klimaänderungen auf Speichersysteme weit verbreitet. Die ausführliche Darstellung unterstützt einerseits die Einordnung der Modellkette von KLIFWA und die Funktion von PANTA RHEI in derselben. Andererseits können die Auswirkungen des Klimawandels auf die Speicherbewirtschaftung in unterschiedlichen Kontinenten verglichen werden.

4.6.1 Auswirkungen

Das Ausmaß der Auswirkungen des Klimawandels auf die Speicherbewirtschaftung ist regional stark unterschiedlich. Am dramatischsten sind die erwarteten Änderungen in Indien, deutliche Auswirkungen werden im ebenfalls durch den Monsun geprägten Süd-Korea erwartet. Einmal abgesehen von den Monsungeprägten Ländern, sind die Änderungen der Wasserbilanz in den Fallbeispielen gleich. Einer deutlichen Zunahme der Winterzuflüsse mit einer Erhöhung der Hochwasserwahrscheinlichkeit stehen schwache Rückgänge im Sommer gegenüber. Die Autoren können meist zeigen, dass eine Anpassung der Bewirtschaftung diese Änderung mit nur geringen Einbußen der Leistungsfähigkeit auffangen bzw. deutlich verringern kann. Eum et al. (2012) weisen in Korea nach, dass die Größe des Speichers das Ausmaß der Auswirkungen deutlich beeinflusst. Dies stellen auch Krol et al. (2011) für Brasilien fest, wo zahlreiche kleine Speicher die Versorgungssicherheit der großen Speicher „kannibalisieren“, ohne selbst eine vergleichbare Versorgungssicherheit aufzuweisen. Damit kann bereits an dieser Stelle festgestellt werden, dass mit Auswirkungen des Klimawandels auf die Speicher im Westharz schon allein wegen ihrer geringen Größe gerechnet werden kann. Die Untersuchung von Brekke et al. (2009) ist ein deutlicher Hinweis, dass gegenwärtig der Fokus von Impakt-Untersuchungen sehr auf Seiten der Klimamodelle liegt, obwohl eine Änderung der Bewirtschaftung deutlich mehr zur Gesamtunsicherheit beiträgt als die Unsicherheit der Klimamodelle.

4.6.2 Komplexität

Die Nutzung einer Vielzahl von Globalmodellen bedingt in der Studie von Brekke et al. (2009) für Kalifornien ein statistisches Downscaling und ein sehr einfaches konzeptionelles Wasserhaushaltsmodell. Mit dieser Modellkette können lange Zeitreihen verarbeitet werden. Die Koppelung mit dem Schneemodell nach Anderson (1973) stellt die Berücksichtigung klimatisch bedingter Änderungen im Winter sicher. Die Modellierung der Speicher erfolgt, vom Wasserhaushalt getrennt, in einem Speichersimulationsmodell. Dem gegenüber steht die Arbeit von Asokan und Dutta (2008), in der ein Globalmodell, mit Thiessen-Polygonen herunterskaliert, die Eingangsdaten für ein weitgehend physikalisches Modell liefert. Dieses kann aufgrund seiner Komplexität nur einzelne Monate der Vergangenheit und Zukunft für einen Vergleich berechnen. Noch einen Schritt weiter gehen Krol et al. (2011), indem sie Globalmodelle ohne Downscaling in der Wasserhaushaltsmodellierung verwenden. Dazwischen ordnen sich die anderen Fallbeispiele ein. Eum et al. (2009) verwenden zwei Globalmodelle und statistisches Downscaling mit einem Wettergenerator. Die Verwendung eines konzeptionellen Wasserhaushaltsmodells, das die Eingangsdaten für ein Speichersimulationsmodell liefert, stellte eine Parallele zur Arbeit von Brekke et al. (2009) dar. In den deutschen Fallbeispielen spielen die regionalen Klimamodelle eine weitaus bedeutendere Rolle als in den internationalen. Die Verwendung von REMO und WETTREG ist die Regel, in manchen Studien werden sie durch CLM und STAR ergänzt. Dafür wird häufig nur ein Globalmodell, ECHAM5/MPI-OM, verwendet. Hier reiht sich die KLIFWA-Modellkette nahtlos ein.

4.6.3 Modellstruktur

Häufig findet sich in den Fallbeispielen die Verwendung des Schneemodells nach Anderson (1973). Damit kann davon ausgegangen werden, dass die von Merz et al. (2011) beschriebenen klimabedingten Änderungen im Winter abgebildet werden. Dies kann für den Sommer so nicht vorausgesetzt werden, da die konzeptionellen Verdunstungsansätze eine Veränderung von Vegetationsperioden in der Regel nicht darstellen können. Hier bilden Krol et al. (2011) die Ausnahme, da sie die Vegetationsperiode in Abhängigkeit des Beginns der Regenzeit modellieren. Es überrascht, dass die Autoren sonst weder Parametersensitivität oder Skaleneffekte diskutieren. In der Regel ist die Verwendung des Wasserhaushaltsmodells durch die Historie bedingt. Adaptionen an die neue Aufgabenstellung finden sich nur in der Arbeit von Wagner et al. (2009) für die Elbe. Weiter fällt auf, dass die integrierte Modellierung von Speicherbewirtschaftung und Wasserhaushalt außer im vorgenannten Beispiel nicht erfolgt. Dies erscheint problematisch, da die Speicherbewirtschaftung den Wasserhaushalt häufig deutlich beeinflusst.

4.6.4 Folgerungen für die vorliegende Arbeit

Um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Speicherbewirtschaftung detailliert zu untersuchen, wird in dieser Arbeit auf eine größere Anzahl von Globalmodellen verzichtet. Die Konzentration auf ein Globalmodell ermöglicht die Verwendung des dynamischen Regional-

modells REMO neben dem statistischen Regionalmodell WETTREG. Nur ein dynamisches Regionalmodell kann Klimadaten im Stundenzeitschritt liefern und erlaubt damit eine Abschätzung der Entwicklung von Hochwasserextremen in kleinen Einzugsgebieten. Keine der in der Literaturrecherche vorgestellten Studien verfolgt diesen Ansatz.

Wie der folgende Abschnitt zeigen wird, wurde das Wasserhaushaltsmodell PANTA RHEI für die Klimafolgenforschung so erweitert, dass Verdunstung und Schneeschmelze abhängig von den klimatischen Rahmenbedingungen modelliert werden. Die Berücksichtigung der Zeitstabilität von Modellparametern in der Fragestellung angemessener Form kann daher vorausgesetzt werden. Der Speicherbetrieb ist in PANTA RHEI integraler Bestandteil des Wasserhaushaltsmodells. Damit werden der hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung geschuldete lange Rechenzeiten in vertretbarem Rahmen gehalten und Wechselwirkungen zwischen Speicherbewirtschaftung und Wasserhaushalt berücksichtigt.

Kalibrierintervalle von 30 Jahren sind einerseits für die Klimafolgenforschung nötig, aber wegen der Datenverfügbarkeit nur auf Tagesbasis möglich. Übersteigt andererseits der Kalibrierzeitraum eines Modells ca. fünf Jahre, kann davon ausgegangen werden, dass ein Großteil der zeitlichen hydrologischen Variabilität erfasst ist und eine angemessene Prognosefähigkeit des Modells erreicht wird. In der vorliegenden Arbeit werden beide Ansätze kombiniert. Die Modellierung von Langzeitkontinuen der Zukunft erfolgt mit einem an einem langen Beobachtungszeitraum kalibrierten Modell im Tageszeitschritt. Es wird ergänzt durch ein Modell im Stundenzeitschritt, das wegen der Datenverfügbarkeit nur für einen Zeitraum von sieben Jahren an Beobachtungsdaten kalibriert werden konnte, aber für Langzeitkontinuen im Stundenzeitschritt Aussagen über die Entwicklung von Hochwasserextremen erlaubt. Stützen sich die Aussagen der Modelle auf Tages- und Stundenbasis gegenseitig, erhöht dies die Belastbarkeit des Ergebnisses.

Die Zusammenführung von hydrologischer Modellierung einerseits und ökonomischer Analyse andererseits ermöglicht eine ökonomische Bewertung sowohl der Folgen des Klimawandels als auch möglicher Anpassungsmaßnahmen und damit eine Abschätzung ihrer gesellschaftlichen Relevanz. Dies erfolgt in den vorgestellten Studien nicht und ist daher der wesentliche innovative Ansatz der hier vorgelegten Arbeit.

4.7 Das Hydrologische Modellsystem PANTA RHEI

Am Leichtweiß-Institut existiert eine lange Tradition der Entwicklung und Anwendung hydrologischer Modelle. Seit beinahe zwei Dekaden dient das konzeptuelle hydrologische Modell NAXOS als Grundlage für die Planung wasserwirtschaftlicher Vorhaben und für Forschungsarbeiten. PRAEDICT, ein für die Hochwasservorhersage angepasstes NAXOS wird auf 15% der deutschen Fläche angewendet (Meon et al., 2007, Riedel, 2006). Besondere Funktionen ermöglichen in Naxos die Modellierung tidebeeinflusster Einzugsgebiete (Riedel, 2004, Maniak et al., 2002).

Zunächst in Kooperation mit der Prof. Hartung und Partner Ingenieurgesellschaft mbH Braunschweig, später mit dem Institut für Wassermanagement GmbH, Braunschweig, entwickelte das Leichtweiß-Institut den NAXOS-Nachfolger PANTA RHEI. Das in C++ geschrie-

Das Programm folgt aktuellen Standards des Softwareengineering in Bezug auf Nutzerfreundlichkeit und Erweiterbarkeit. Da die Anwendung des Modells anspruchsvolles Preprocessing räumlicher Daten erfordert, verfügt es über eine GIS-Schnittstelle für den Datenimport. Im Rahmen des Preprocessings werden Einzugsgebiete in Teilflächen untergliedert. Bodeneigenschaften und Landnutzung dienen der Differenzierung der Teilflächen in Hydrotope. Für jedes Hydrotop werden die hydrologischen Prozesse berechnet und auf Teilflächen-Ebene bilanziert.

Das modulare Konzept erlaubt die Implementierung unterschiedlicher Prozeduren für denselben hydrologischen Prozess. Prozeduren werden in Ansatzkonfigurationen organisiert. Konzeptionelle Ansatzkonfigurationen erlauben sowohl die schnelle Berechnung langer Zeitreihen als auch eine nahe Echtzeit-Modellierung im Rahmen der Vorhersage. Seit Januar 2011 wird PANTA RHEI im operationellen Betrieb für die Hochwasservorhersage in Niedersachsen durch die Vorhersagezentrale beim Niedersächsischen Landesdienst für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) Hildesheim-Hannover eingesetzt.

4.7.1 Ansatz zur Modellierung des Wasserhaushalts

Die konzeptionelle Ansatzkonfiguration wurde für die Planung wasserwirtschaftlicher Maßnahmen und die Hochwasservorhersage entwickelt. Kurze Rechenzeiten und eine einfache Kalibrierung waren daher zunächst wichtiger als ausführliche physikalische Beschreibungen der hydrologischen Prozesse. Inzwischen wurde das Modell, insbesondere bezüglich Bodenwasserhaushalt (Kreye et al., 2010), Verdunstung (Förster et al., 2012) und Schnee (Förster, 2013) für Forschungszwecke erheblich erweitert. Die Tabelle 4-1 führt Prozesse und Beschreibungen der konzeptionellen Ansatzkonfiguration auf.

Tabelle 4-1: *Komponenten der konzeptionellen Ansatzkonfiguration ohne aktuelle Erweiterungen der Prozessbeschreibungen für die Klimafolgenforschung.*

Prozess	Beschreibung
potentielle Evapotranspiration	Albrecht-Verteilung
	Haude-Verfahren
	Penman Monteith- Ansatz
Schnee	Grad-Tag-Verfahren
Interzeption	Lutz-Verfahren
Abflussbildung	SCS modifiziert
Abflusskonzentration	Linearspeicher

In der konzeptionellen Ansatzkonfiguration nach Tabelle 4-1 wird der aktuelle Bodenfeuchte nicht explizit berechnet. Stattdessen stehen verschiedene Methoden zur Verfügung, um die potentielle Evapotranspiration zu ermitteln, die anschließend durch Kalibrierung korrigiert wird. Die Bodenfeuchte ergibt sich als Restgröße nach Abzug des Direktabflusses.

Die Albrecht-Verteilung teilt eine Jahressumme mittels Monatskoeffizienten in Monatssummen. Das Haude-Verfahren berechnet die potentielle Evapotranspiration als Produkt des Sättigungsdefizits der Luft um 14:00 Uhr und eines empirischen Monatsfaktors (Maniak, 2005).

Das Penman-Monteith-Verfahren stellt den komplexesten Ansatz zur physikalisch basierten Berechnung der Evapotranspiration aus der Strahlungsbilanz, dem Bodenwärmestrom und dem vegetativen Widerstand dar. Der Wassergehalt wird linear aus der Bodenfeuchte approximiert (Monteith, 1965).

Der Strom fühlbarer Wärme als Energiequelle für die Schneeschmelze ist die wesentliche Eingangsgröße des Tag-Grad Verfahrens, einer Temperatur-Index-Methode. Der Grad-Tag-Faktor wird durch Multiplikation mit der Differenz aus Lufttemperatur und einer vom Anwender vorzugebenden Grenztemperatur kalibriert. Die Grenztemperatur bestimmt, wann die Schneeschmelze beginnt (Maniak, 2005).

Die Interzeption nach Lutz (1984) bilanziert einen Speicher zwischen Gebietsniederschlag und Bodenoberfläche. Speichergröße, Anfangsfüllung und Entleerungsrate, eigentlich abhängig von Vegetation und Jahreszeit, sind vom Anwender vorzugebende Kalibrierparameter. Unter diesen Randbedingungen bilanziert das Verfahren den Speicherinhalt als Funktion von Niederschlag und Evapotranspiration und ermittelt den Bestandsniederschlag.

Die SCS-Methode erlaubt die Berechnung des Direktabflusses aus dem Bestandsniederschlag (USDA, 1986). Kleeberg und Øverland (1989) passten die weitverbreitete Methode für die Hochwasservorhersage an. Die Einführung einer sogenannten Bodenfeuchteabweichung durch Riedel (2003), definiert als Differenz aus mittlerem und aktuellem Wassergehalt eines Hydrotops in mm, ermöglicht den Einsatz der Methode für die Langzeitkontinuumsimulation. Die anfängliche Bodenfeuchteabweichung dient als Kalibrierparameter; während der Modelllaufzeit dient die Bodenfeuchteabweichung als Speicher für die Bodenfeuchte: Da die Bodenfeuchteabweichung den Abstand von der mittleren Bodenfeuchte angibt, kann aus ihr unter Berücksichtigung der maximalen und minimalen Bodenfeuchte der Wassergehalt berechnet werden. Die maximale und minimale Bodenfeuchte berechnet sich mit der allgemeinen SCS-Formel. Die Bodenfeuchteabweichung verändert die curve number CN des nächsten Zeitschrittes wie in Gleichung 5 gezeigt:

$$CN_{(BFA)} = \frac{1000}{\frac{1000}{CN} - \frac{BFA_{(t)}}{25,4}}, CN < 100 \quad 5$$

mit:

$CN_{(BFA)}$: durch Bodenfeuchteabweichung (BFA) modifizierte curve number

CN: curve number der Klasse II

Curve numbers größer 100 werden auf 100 gesetzt.

Jede Teilfläche verfügt jeweils über einen Linearspeicher für Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss, Grundwasserneubildung und Basisabfluss. Diese für die Modellierung der Abflusskonzentration genutzten Speicher unterscheiden sich in der Speicherkonstante k um ungefähr eine Größenordnung. Die Leerlaufzeit k ist eine Kalibriergröße. Das Routing basiert auf einem Linearspeicheransatz, der über Rauheitsbeiwerte nach Gaukler-Manning-Strickler kalibriert werden kann.

4.7.2 Modellanpassungen für die Klimafolgenforschung

Nach Merz et al. (2011) erzeugen verallgemeinernde Annahmen in konzeptionellen Ansätzen für Verdunstung und Schneeschmelze Fehleinschätzungen durch zeitstabile Modellparameter. Die Modellstruktur wurde in PANTA RHEI daher so verändert dass die Teilprozesse, die die Fehleinschätzungen hervorrufen, in den konzeptionellen Ansätzen explizit berücksichtigt werden. Dies wird im Folgenden für die betroffenen Module vorgestellt.

4.7.2.1 Verdunstung

Es gibt deutliche Wechselwirkungen zwischen Klima und Vegetation, die Vegetation aber bestimmt maßgeblich den Wasserhaushalt des Bodens. Nach Menzel (2007) ist die Phänologie wahrscheinlich der einfachste und beste Weg, den Einfluss des Klimawandels auf Ökosysteme zu untersuchen. Er berichtet von einer zeitlichen Verschiebung des Blattaustriebs von 1,2 bis 3,8 Tagen in Nordamerika und Europa. Jedoch fällt die Modellierung dieser Verschiebung nicht leicht. Während in hohen Breitengraden mit ozeanischem Klima die Tageslänge das Pflanzenwachstum limitiert, ist es in ariden Gegenden die Wasserverfügbarkeit. Daher konnten Krol et al. (2011) in Nordostbrasilien den Beginn der Vegetationsperiode mit dem Beginn der Regenzeit gleichsetzen. In gemäßigten Klimazonen sind komplexere Ansätze erforderlich. Jolly et al. (2005) schlugen ein Modell vor, das Wasserdampfdruckdefizit, Sonnenstunden und Temperatur zur Berechnung eines Vegetationsperiodenindex (Growing Season Index GSI) verwendet (Abbildung 4-1).

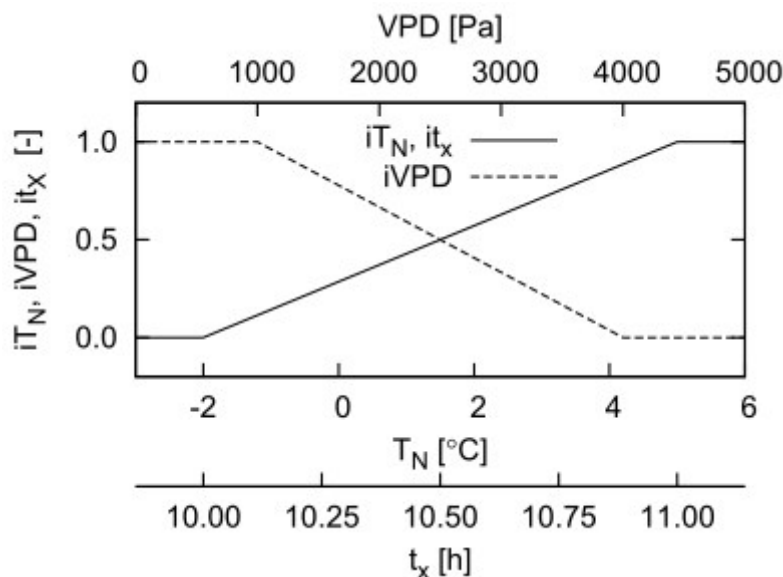


Abbildung 4-1: Indexfunktionen für die minimale Temperatur (iT_n), Wasserdampfdruckdefizit ($iVPD$) und maximale Tageslänge it_X als Eingangsdaten für die Berechnung des GSI (nach Jolly et al., 2005 in Förster et al., 2012).

Der GSI berechnet sich als gleitendes Mittel über 21 Tage aus dem Produkt der drei Indizes. Erreicht er einen Wert von 0,5, wird der Beginn der Vegetationsperiode angenommen.

Der GSI kann aus Satellitendaten mit dem Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) validiert werden. Der NDVI ist eine normierte Angabe der Reflektion grüner Vegetation im nah-infraroten (und gerade nicht mehr sichtbaren) Bereich des Lichts.

Die Abbildung 4-2 zeigt den Verlauf des GSI für die Klimastation Göttingen und das Jahr 2005. Ausgefüllte Flächen zeigen nach Farben die jeweils den GSI limitierende Größe an. Die Werte des NDVI sind als Kreuze angegeben und stimmen im steigenden Ast der Vegetationsperiode gut mit dem GSI überein. Für den fallenden Ast stimmt dies nicht. In der landwirtschaftlich geprägten Umgebung von Göttingen sinkt der NDVI nach der Ernte ab. Während GSI und NDVI in von Laubwald geprägten Regionen gut übereinstimmen, musste für landwirtschaftlich genutzte Flächen ein anderer Ansatz gefunden werden. Förster et al. (2012) erweiterten den GSI-Ansatz um ein Grad-Tag-Verfahren, in welchem Grad-Tage bis zu einem den Erntezeitpunkt bezeichnenden Grenzwert aufaddiert werden.

Der um den Grad-Tag-Ansatz ergänzte GSI-Ansatz wurde in PANTA RHEI implementiert und in Langzeitkontinuumsimulationen überprüft. Durch den Vergleich des dynamischen GSI-Ansatzes mit einem statischen Ansatz konnten Förster et al. (2012) zeigen, dass das Modell in der Lage ist, die Änderung der Evaporation in Abhängigkeit von der Variabilität der Vegetationsperiode zu berechnen. Die jährliche Abflusshöhe änderte sich gegen den statischen Ansatz zwar nur um zwei Prozent, auf monatlicher Basis konnten jedoch Veränderungen bis zu fünf Prozent beobachtet werden. Damit ist das Wasserhaushaltsmodell in der Lage, den Einfluss des Klimawandels auf die Verdunstung zu modellieren. Dies ist nach Merz et al. (2011) eine entscheidende Voraussetzung für eine zutreffende Modellierung des Wasserhaushalts unter Einfluss des Klimawandels.

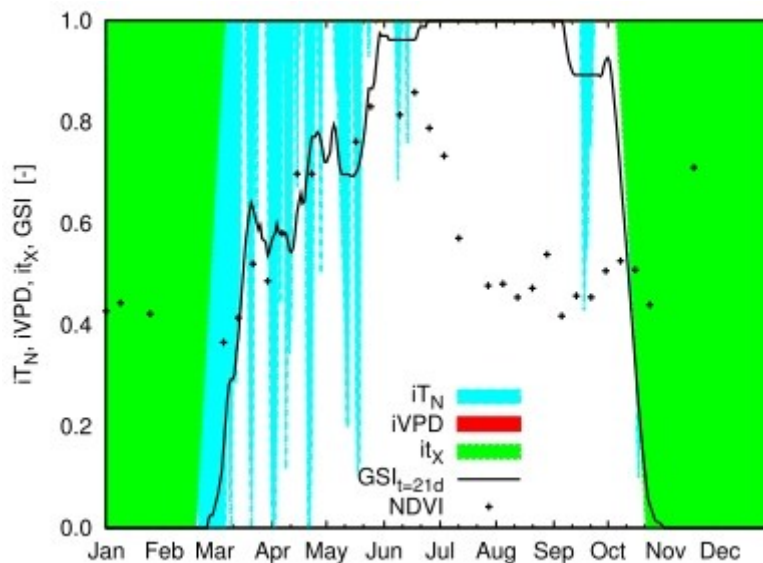


Abbildung 4-2: Zeitreihe des aus Beobachtungsdaten berechneten GSI für die Klimastation Göttingen im Jahr 2005 und Werte des NDVI (Förster et al., 2012).

4.7.2.2 Das Schneemodell nach Anderson

Eine weitere Voraussetzung für eine zutreffende Modellierung des Wasserhaushalts unter Einfluss des Klimawandels ist nach Merz et al. (2011) eine Formulierung des Schneemodells, die den Einfluss von Regen-auf-Schnee-Ereignissen (Taufluten) wiedergeben kann. Wie in Kapitel 4 gezeigt, wird das Schneemodell nach Anderson (1973) häufig für diese Fragestellung eingesetzt. Daher wurde es von Förster (2013) als zusätzliches Modul in PANTA RHEI implementiert.

Wie das vereinfachte Ablaufdiagramms in Abbildung 4-3 zeigt, bilden Temperatur und Niederschlag die Eingangsdaten für das Modul. Fällt Niederschlag bei Temperaturen unter 0°C , bildet sich, abhängig von der Temperatur des Untergrundes, eine Schneedecke. Für jeden Zeitschritt, unabhängig davon ob und in welcher Form Niederschlag fällt, wird der Energieaustausch der Schneedecke mit der Luft und dem Untergrund berechnet. Bei einer Energieaufnahme der Schneedecke füllt sich ihr Flüssigwasserspeicher und ihr Wärmedefizit sinkt. Das Wärmedefizit beschreibt die Temperaturdifferenz zum Schmelzpunkt. Dabei ändert sich der thermische Gradient innerhalb der Schneedecke. Fällt Regen auf die Schneedecke, gefriert er und verringert dabei das Wärmedefizit weiter. Eine reife Schneedecke hat ein Wärmedefizit von 0°C und keinen thermischen Gradienten, da ihre Temperatur überall 0°C beträgt. Übersteigt die Lufttemperatur 0°C , setzt die Schneeschmelze ein. Fällt Regen auf eine reife Schneedecke, gibt sie unmittelbar Wasser ab, allerdings nur solange, bis der in die Schneedecke eindringende Niederschlag auf 0°C abgekühlt ist. Dies wird mit einem Energiebilanzansatz ermittelt. Beispielsweise beträgt bei einer Niederschlagstemperatur von 10°C die Schmelze nur 12,5% des gefallen Niederschlags. Ohne Niederschlag wird der Schmelzwasserabfluss nach dem Grad-Tag-Verfahren berechnet. Aus der Bilanzierung gefrorenen und flüssigen Wassers in der Schneedecke wird die Wasserabgabe aus der Schneedecke berechnet.

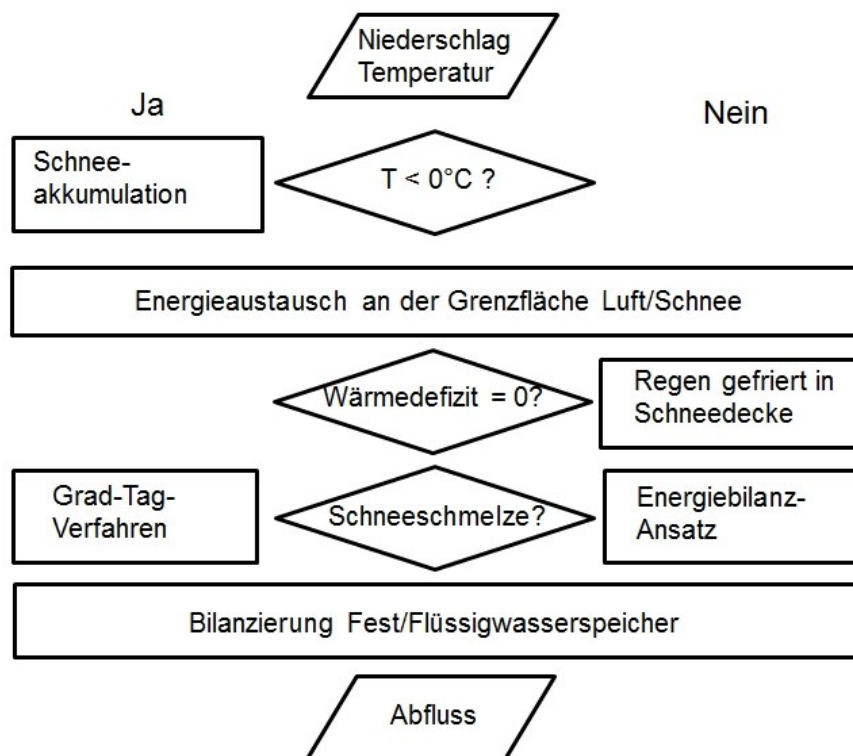


Abbildung 4-3: Vereinfachtes Ablaufdiagramm des Schneemodells nach Anderson (1973).

Anderson (1973) bezeichnet sein Modell als konzeptionellen Ansatz, der die wichtigen physikalischen Prozesse innerhalb der Schneedecke in parametrisierter Form enthält. Die dafür erforderlichen zwölf Parameter lassen einen hohen Kalibrierungsaufwand vermuten, jedoch zeigten die im Westharz gesammelten Erfahrungen, dass neben dem Grad-Tag-Faktor nur vier weitere Parameter einen deutlichen Einfluss auf die Kalibrierung haben. Diese sind Vortemperaturindex, negativer Schmelzfaktor, Temperatur, bei der Schneeschmelze einsetzt, sowie Temperatur, unterhalb derer Niederschlag als Schnee fällt. Mit dem Vortemperaturin-

des wird der Einfluss der Temperatur vorheriger Zeitschritte auf den thermischen Gradienten innerhalb der Schneedecke und damit auf den Energieaustausch des aktuellen Zeitschritts ausgedrückt. Der negative Schmelzfaktor (also eigentlich Gefrierfaktor) beeinflusst die Geschwindigkeit der Änderung des Wärmedefizits innerhalb der Schneedecke. Die Kalibrierung dieser fünf Parameter stellte einen sehr hohen Aufwand dar. Eine gute Wiedergabe der Schneeschmelze wurde dabei von einem gut getroffenen Abflussmaximum im März in der langfristigen Abflussbilanz auf Monatsbasis angezeigt.

5 Optimierung von Talsperrenverbundsystemen

In der Literaturstudie des 4. Kapitels wurden in einigen wenigen Fallbeispielen Optimierungsalgorithmen kurz angerissen. Dies reicht jedoch nicht aus, um die Wahl eines bestimmten Algorithmus für die Anpassung des Talsperrenbetriebs an eine geänderte Hochwasserbelastung hinreichend zu begründen. Dieses Kapitel gibt daher einen möglichst knappen Überblick über die in der Optimierung des Talsperrenbetriebs eingesetzten Algorithmen. Auf den später verwendeten genetischen Algorithmus wird detaillierter eingegangen.

Die Optimierung von Talsperrenverbundsystemen ist seit vielen Jahren Gegenstand von Praxis und Forschung. Einen guten Überblick über Simulation und Optimierungsstrategien von Talsperrenverbundsystemen geben Rani und Moreira (2009). Danach basieren Simulationsmodelle im Allgemeinen auf der Erhaltung der Massenbilanz in Form der Speichergleichung unter Verwendung der Zuflüsse und der Betriebsregeln, selten enthalten sie eine ökonomische Komponente. Die Verwendung von Simulationsmodellen im Rahmen von Optimierungssystemen ist eine Herausforderung. Optimierungsalgorithmen erfordern einerseits die Beschreibung des Gesamtsystems durch eine Zielfunktion und eine begrenzte Anzahl von Randbedingungen, was sie ungeeignet für die Beschreibung komplexer hydrologischer Prozesse macht. Andererseits können Simulationsmodelle wegen ihrer Komplexität schwerlich in eine Zielfunktion zur Minimierung oder Maximierung bestimmter Ziele integriert werden. Dies gilt in noch weit stärkerem Maße für Wasserhaushaltsmodelle. Rechenaufwand und Zeitbedarf machen deren Koppelung mit einem Optimierungsalgorithmus und rekursive Anwendung unmöglich.

Loucks et al. (2005, S. 132) schlagen daher vor, Optimierungsalgorithmen in erster Linie zur Verminderung der Planungsalternativen einzusetzen und die verbleibenden anschließend in einem Simulationsmodell zu untersuchen. Eine gute Einführung in die Verwendung von Optimierungsverfahren geben Loucks et al. 2005 (S. 81 ff), einfach verständlich und mit vielen Rechenbeispielen versehen ist die Beschreibung von Gocht (2008). Im Folgenden wird eine mathematische Definition von Algorithmen durch eine intuitive Annäherung ersetzt.

5.1 Klassische Optimierungsstrategien

5.1.1 Strukturiertes Ausprobieren

Eine traditionelle Herangehensweise an die Optimierung ist das strukturierte Ausprobieren. Diese eher zeitaufwendige Methode führte nicht nur bei Talsperrenverbundsystemen häufig zum Erfolg. Auch die Kalibrierung des im Verlauf dieser Arbeit vorgestellten Wasserhaushaltsmodells PANTA RHEI bedient sich dieser Strategie. Ein einfaches Beispiel zeigt Abbildung 5-1. In fünf Zeitschritten wird eine optimale Lösung in einem durch eine graue Linie bezeichneten eindimensionalen Lösungsraum gefunden. Eine einfache Regel gibt dem Ausprobieren Struktur: Teile die Linie in zwei Hälften und untersuche, in welcher der Hälften das Optimum liegt. Dann halbiere die Linie und untersuche wieder, in welcher Hälfte es sich be-

findet. Im fünften Schritt ist das Optimum in diesem Beispiel so weit eingegrenzt, dass eine weitere Halbierung das Ergebnis nicht mehr verbessert.



Abbildung 5-1: Optimieren durch strukturiertes Ausprobieren.

Mit jedem Schritt halbiert sich in diesem Beispiel der Suchbereich, die sogenannte Schrittweite des Algorithmus. Es ist jedoch klar, dass die Schrittweite die Qualität der Lösung beeinflusst. Drittelt man die Linie, anstatt sie zu halbieren, wird das Ergebnis etwas anders ausfallen. Da die Wahl der Schrittweite subjektiv ist, ist auch die aufgefundene Lösung subjektiv. Die noch heute gültigen Betriebsregeln der Talsperren im Westharz wurden mit einem Speichersimulationsmodell auf der Basis von Tagesmittelwerten der Zeitreihe 1951-1980 durch strukturiertes Ausprobieren ermittelt (Maniak und Seeger, 1988). Strukturiertes Ausprobieren kann allerdings nicht den Beweis erbringen, dass eine gefundene Lösung optimal ist. Ein weiteres Ausprobieren wird dann unterlassen, wenn die Verbesserung pro Versuch nicht mehr in einem sinnvollen Verhältnis zur dafür erforderlichen Zeit steht.

5.1.2 Lineares Programmieren

Lund und Guzman (1999) beschrieben eine Reihe von verbalen Betriebsregeln für in Reihe oder parallel betriebene Speicher. Regeln wie „Maximiere den Inhalt in Speichern mit der größten Energieproduktion“ oder „Gleiche die Wahrscheinlichkeit des Überlaufens für alle Speicher an“ eignen sich direkt für den operationellen Einsatz oder die Simulation und haben eine gute empirische Basis. Für die zweite Regel formulierten sie ein sogenanntes „lineares Programm“. Dieses beschreibt das zu untersuchende System in einer linearen Zielfunktion und einer Reihe von linearen Randbedingungen. Die Lösung eines solchen Programms ist auf unterschiedliche Weise möglich, der klassische Algorithmus hierfür ist der Simplex-Algorithmus nach Dantzig (1963). Auf diesen geht auch die Bezeichnung „lineares Programmieren“ zurück. Der Simplex-Algorithmus ist ein auf Zeilen- und Spaltentausch basierendes Matrizenverfahren und ist für einfache Anwendungen auch manuell lösbar. Er hat daher heute eher in Einführungen in die Optimierung als in praktischen Anwendungen Bedeutung. Wichtig ist an dieser Stelle, dass Optimierung stets zwei Bausteine hat: das das System beschreibende Programm und den zur Optimierung verwendeten Algorithmus.

5.1.3 Dynamisches Programmieren

Dynamisches Programmieren wurde von Bellmann (1957) zur Lösung von mehrstufigen Entscheidungsprozessen eingeführt und eignet sich besonders zur Optimierung von Zeitreihen. Seine Anwendbarkeit auf Talsperrensysteme erhält es durch die Auflösung des mehrstufigen Prozesses in eine Serie einfacherer Teilprobleme, die nacheinander gelöst werden. Sowohl

nichtlineare als auch stochastische (zufallsbasierte) Komponenten können integriert werden (Rani und Moreira 2009). Da die Teilprobleme am Ende jedoch zusammengeführt werden müssen, ist für jede Abgabeoption jedes Zeitschritts eine Entscheidungsvariable mitzuführen. Daher steigt der Rechenaufwand exponentiell mit der Zeitreihenlänge. Dies begrenzt die Anwendung auf monatliche Zeitschritte, was dynamisches Programmieren für die hier zu untersuchenden Langzeitkontinuen im Stundenzeitschritt ausschließt. Wichtig ist die Feststellung, dass die Mitführung zeitschrittabhängiger Variablen starken Einfluss auf die Leistungsfähigkeit eines Optimierungsalgorithmus hat.

5.1.4 Nichtlineares Programmieren

Verfahren der direkten Suche sind eine Formalisierung des strukturierten Ausprobierens für den mehrdimensionalen Raum. Er kann als Raster vorgestellt werden, dessen dritte Dimension die Tiefe angibt. Der Algorithmus startet an einer beliebigen Stelle mit einer vorgegebenen Schrittweite und untersucht alle vier Richtungen danach, ob ein Niveau gefunden wird, das tiefer als das Ausgangsniveau liegt. Findet er eine solche Stelle, begibt er sich dorthin und wiederholt die Prozedur. Findet er keine, verringert er die Schrittweite und wiederholt die Prozedur ebenfalls. Wird bei einer vorgegebenen Mindestschrittweite keine weitere Verbesserung gefunden, ist ein Optimum erreicht. Die Lagegenauigkeit dieses Optimums ist, wie bereits diskutiert, von der Schrittweite bestimmt.

Die unbefriedigende Situation, nicht zu wissen, ob eine Lösung wirklich ein globales Optimum ist, kann durch Gradientenverfahren bereinigt werden. Die zum grundlegenden Verständnis notwendige Analytische Geometrie ist einfach: Die Nullwerte der ersten Ableitung einer Funktion geben die Extremwerte an. Eine positive zweite Ableitung zeigt ein (lokales) Minimum an, eine negative ein (lokales) Maximum. Im Fall einer Parabel $y = x^2$ führt das Verfahren notwendiger Weise zu einem globalen Optimum. Dies macht quadratisches Programmieren beliebt. Im mehrdimensionalen Raum wird aus der ersten Ableitung die Matrix der ersten partiellen Ableitungen, die sogenannte Jacobi-Matrix. Die Matrix der zweiten partiellen Ableitungen wird Hesse-Matrix genannt. Die Abbildung 5-2 zeigt eine Rotationsparabel im dreidimensionalen Raum. Es gibt unterschiedliche Ansätze, Polynome höheren Grades, wie beispielsweise das in Abbildung 5-3 gezeigte, in quadratische Polynome umzuformen. Vertrauensbereichsansätze (trust region approaches) nähern einem Bereich des Lösungsraums eine Parabel an, Stützvektormaschinen (Support Vector Machines) transformieren das Problem in einen höherdimensionalen Hilbert-Raum, in dem das Problem in jeder Dimension durch quadratisches Programmieren lösbar wird.

Eine intuitive Vorstellung eines gradientenbasierten Lösungsalgorithmus ist eine Kugel, die in eine der künstlichen Landschaften der Abbildung 5-2 oder der Abbildung 5-3 gelegt wird. In der Rotationsparabel wird die Kugel sicher im globalen Optimum liegen bleiben. In der in Abbildung 5-3 für den dreidimensionalen Raum gezeigten Funktion von Himmelblau (1972) ist dies nicht so. Sie hat vier identische lokale Minima, die allerdings alle mit Gradientenverfahren aufgefunden werden können. In der Rotationsparabel wird eine ‚gebremste Kugel‘, beispielsweise ein Polyeder, schneller im Optimum liegen bleiben, in der Funktion nach Himmelblau wird eine unvollkommene Form eher zum Hindernis, weil die Gradienten in der

Nähe der lokalen Minima klein sind. Legt man die Kugel in mehreren Versuchen an unterschiedlichen Stellen von Himmelblaus Funktion ab, steigt die Wahrscheinlichkeit, dass alle Minima aufgefunden werden.

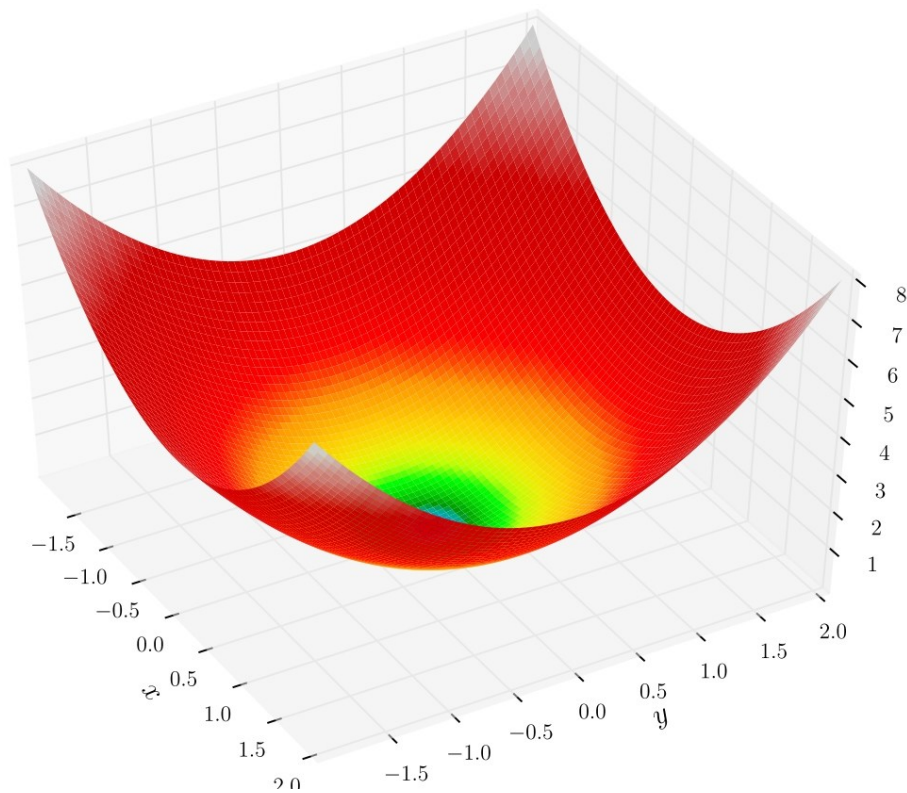


Abbildung 5-2: Rotationsparabel im dreidimensionalen Raum (Bäck, 1995).

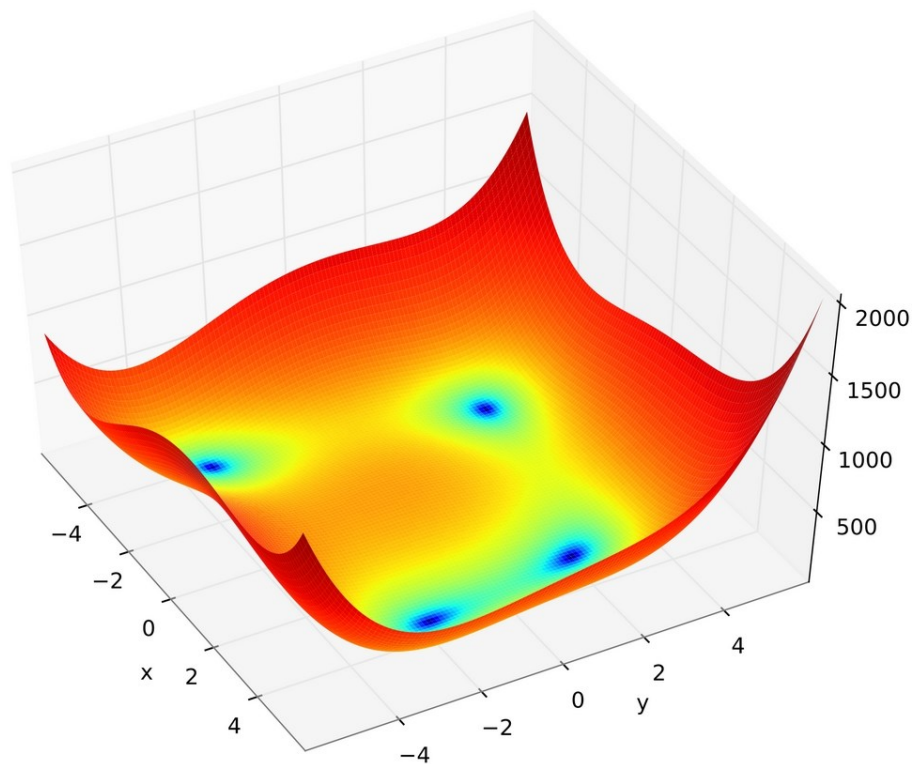


Abbildung 5-3: Funktion nach Himmelblau im dreidimensionalen Raum (Himmelblau, 1972).

Gradientenverfahren geraten dann an ihre Grenzen, wenn in den künstlichen Landschaften Unstetigkeiten auftauchen, also, um im Bilde zu bleiben, steile Wände aufragen, an denen die Kugel liegen bleibt. Dies wird anhand einer Fallstudie erläutert:

Ferreira und Teegavarapu (2011) optimierten den Betrieb eines kleinen Laufwasserkraftwerks ($S = 1,54 \text{ Mio m}^3$) in Brasilien unter Berücksichtigung der Wasserqualität. Hierzu formulierten Sie ein gemischt-ganzzahliges, nichtlineares Optimierungsproblem mit Randbedingungen:

Die Zielfunktion enthielt die Kriterien ‚leerer Speicher am Ende der Simulation‘, ‚keine Speicherüberläufe‘ und ‚gute Turbinenauslastung‘.

Der Wasserkraftbetrieb erfordert die Zuordnung bestimmter Wassermengen zu den Turbinen, um einen effizienten Betrieb sicherzustellen, da Turbinen für einen Nenndurchfluss ausgelegt sind. Die Unterschreitung ihres Mindestdurchflusses kann die Turbinen beschädigen, Betrieb mit Teillast führt zu suboptimaler Produktion. Der Wirkungsgrad der Turbinen, die Druckhöhe und der Durchfluss sind die bestimmenden Randbedingungen. Daher muss die Formulierung des Optimierungsproblems das An- und Abschalten von Turbinen berücksichtigen. Dies geschieht mit einer binären Entscheidungsvariablen, die die Werte 0 (aus) und 1 (an) annehmen kann. Eine solche sprunghafte Änderung ohne Zwischenwerte stellt eine Unstetigkeit im Lösungsraum dar.

Die Randbedingung bezüglich Wasserqualität war ein Mindestdurchfluss in Abhängigkeit von der organischen Belastung in der Fließstrecke zwischen dem kleinen Speicher der Laufwasserkraftanlage und dem Kraftwerksgebäude, da das Wasser, das den Turbinen durch ein Fallrohr zugeleitet wurde, in dieser Fließstrecke fehlte. Der Mindestdurchfluss musste so hoch sein, dass die Stickstoff- und Phosphorkonzentration aus einer organischen Punktquelle in der Ausleitungsstrecke bestimmte Grenzwerte einhielt. Den Abbau modellierten sie mit einer fallenden e-Funktion.

Eine Lösung des Programms für einen Zeitraum von 15 Tagen auf Tagesbasis mit einem Gradientenverfahren gelang nicht. Zum Ziel führte sie jedoch ein genetischer Algorithmus.

5.2 Populationsbasierte Algorithmen

Aus der einzelnen Kugel im Beispiel zu Gradientenverfahren wird in populationsbasierten Algorithmen eine Anzahl von Kugeln, die gemeinsam den Lösungsraum untersuchen und dabei auch aneinander anstoßen, also Information austauschen können.

Lohr (2001) grenzt genetische Algorithmen und evolutionäre Algorithmen durch die Urhebererschaft ab. Während er die Entwicklung genetischer Algorithmen dem Amerikaner John Holland zuschreibt, nennt er als Urheber der evolutionären Algorithmen den Deutschen Rechenberg. Rani und Moreira (2009) hingegen zählen genetische Algorithmen zur Klasse der evolutionären Algorithmen, der sie unter anderem auch Partikelschwarmoptimierung, Ameisenkolonieoptimierung und simuliertes Abkühlen (Simulated Annealing) zuordnen. Gemein ist diesem ‚Optimierungszoo‘ die Verwendung von Populationen, die auf unterschiedliche Art und Weise Information austauschen oder von Generation zu Generation weitergeben.

5.2.1 Biologisch motivierte Algorithmen

Biologisch motivierte Algorithmen sind in der Regel genetischen Algorithmen ähnlich, verfügen aber über einfachere Prozesse der Vererbung. Trotz ihrer amüsanten Namen sind sie ernst zu nehmende Algorithmen für die Optimierung sehr komplexer Systeme und multikriterielle Fragestellungen. Aktuelle Anwendungen finden sie unter anderem in Kumar und Reddy (2006) sowie Reddy und Kumar (2007) zur Optimierung von Mehrzweckspeichern mit Ameisenkolonie- und Partikelschwarmoptimierung. Letztere setzten auch Ostadrahimi et al. (2011) sowie Guo et al. (2013) ein. Ein Beispiel für einen multikriteriellen makroevolutionären Ansatz geben Liu et al. (2011).

5.2.2 Genetische Algorithmen

Oliveira und Loucks (1997) stellten die Optimierung empirischer Betriebsregeln anhand eines Speichersimulationsmodells und eines genetischem Algorithmus vor, davon ausgehend, dass diese Herangehensweise einige der mit traditionellen Optimierungstechniken verbundenen Begrenzungen überwindet. Da dieser Ansatz später in dieser Arbeit verwendet wird, erfolgt hier eine ausführlichere Beschreibung.

Genetische Algorithmen sind heuristische (auf Erfahrung basierende) Techniken, um im Lösungsraum eines gegebenen Problems die beste Lösung zu finden. Inspiriert durch Charles Darwins Prinzip der Evolution entwickelte Holland (1992) eine intelligente Form der Zufallsuche, die unter Verwendung der natürlichen Mechanismen Selektion und Reproduktion die günstigeren Regionen des Lösungsraums findet und die Suche dort intensiviert. Eine einfache Annahme verleiht genetischen Algorithmen ihre Mächtigkeit: Die beste Lösung ist mit größerer Wahrscheinlichkeit dort zu finden, wo sich ein hoher Anteil guter Lösungen befindet. Solche günstigen Regionen können durch Zufallssuche im gesamten Lösungsraum lokalisiert werden. In einer günstigen Region intensiviert der Algorithmus seine Suche, ohne die Suche nach anderen günstigen Regionen aufzugeben.

Die Unabhängigkeit von einem spezifischen Problem oder System ist ein großer Vorzug genetischer Algorithmen. Sie benötigen lediglich eine Maßzahl für die Leistung des Systems, das nichtlinear, nichtdifferenzierbar und sogar diskontinuierlich sein kann. Einzige Voraussetzung ist, dass sich die Maßzahl für eine Lösung effizient berechnen und mit der Leistung anderer Lösungen vergleichen lässt. Dies kann auch in einem Simulationsprogramm erfolgen. Ein Nachteil genetischer Algorithmen ist die Vielzahl der erforderlichen Auswertungen, die hohe Anforderungen an die Effizienz des Simulationsprogramms stellt. Ein weiterer, dass ein mathematischer Nachweis für ein globales Optimum nicht erbracht werden kann. Dies bleibt Gradientenverfahren vorbehalten. Der genetische Algorithmus bricht ab, wenn die Verbesserung von Generation zu Generation eine gesetzte Schranke unterschreitet (Oliveira und Loucks, 1997).

Oliveira und Loucks (1997) verwendeten abschnittsweise linearisierte Abgabefunktionen für die Betriebsoptimierung. Die Koordinaten der Stützstellen einer linearisierten Abgabefunktion bildeten als Entscheidungsvariablen des Optimierungsproblems die ‚Gene‘ des ‚Chromosoms‘ oder ‚Individuums‘. Seine Leistung wird im Simulationsmodell bewertet und vom genetischen Algorithmus selektiert und reproduziert.

Die erste Generation von Individuen erzeugt der Algorithmus zufällig. In der zweiten Generation werden die Individuen so geordnet, dass nicht zwei gleiche Individuen ein Paar bilden. Diese ungleichen Paare werden die Eltern der Nachfolgegenerationen, die Kreuzung, Mutation und Selektion unterliegen. Die Durchführung der Vererbung erfordert die Angabe von Wahrscheinlichkeiten. Die Größe der Population ist kritisch für das Optimierungsergebnis. Eine zu kleine Population kann den Lösungsraum nicht ausreichend ‚besiedeln‘ und wird daher manche günstigen Regionen nicht finden. Je komplexer das untersuchte System, umso größer muss die Population sein.

Als mögliche Verbesserung schlagen Oliveira und Loucks (1997) vor, erstens die Anfangspopulation nicht zufällig, sondern auf der Grundlage von Erfahrungswerten zu erzeugen. Zweitens sollte das Ergebnis des genetischen Algorithmus durch ein Gradientenverfahren weiter verbessert werden. Ein Mechanismus könnte drittens die Kreuzungs- und Mutationsrate abhängig von der erreichten Verbesserung automatisch anpassen. Viertens wäre es nach ihrer Meinung sinnvoll, die im Simulationsmodell verwendete Zeitreihenlänge im Verlauf der Optimierung anzupassen.

Cai et al. (2001) verwendeten einen genetischen Algorithmus zur Optimierung der Energieproduktion im Einzugsgebiet des Syr Sarya in Kasachstan. Zielfunktion und Randbedingungen bildeten sie als lineares Programm ab. Die Lösung des genetischen Algorithmus konnten sie mit einem Gradientenverfahren deutlich verbessern. Auch Reis et al. (2006) optimierten den Betrieb eines Talsperrenverbundsystems mit einem genetischen Algorithmus und einem linearen Programm unter Verwendung stochastischer Komponenten. Kumar et al. (2006), Reddy und Kumar (2007), Jothiprakash und Arunkumar (2013) sowie Sreekanth et al. (2012) setzten genetische Algorithmen erfolgreich für die Optimierung des Speicherbetriebs ein. Evolutionäre Algorithmen und unter ihnen die genetischen Algorithmen sind in der aktuellen Literatur die am häufigsten zu diesem Zweck eingesetzten Verfahren.

Abschließend wird die Fallstudie von Ferreira und Teegavarapu (2011) nochmals aufgenommen. Bei ihrer Anwendung des genetischen Algorithmus bestand ein Individuum aus einem Vektor von fünf Entscheidungsvariablen mit je 15 Werten: den Teildurchflüssen durch die beiden Turbinen, dem Status der beiden Turbinen (an/aus) und der Mindestwasserführung für je 15 Tage. Sie verwendeten eine Population von 100 Individuen mit einer Kreuzungsrate von 0,5 und einer Mutationsrate von 0,3, um nach 50 000 Generationen einen günstigen Bereich im Lösungsraum zu finden. Ihn untersuchten sie dann genauer mit einer Population von 1 000 Individuen mit unveränderter Kreuzungsrate und auf 0,1 reduzierter Mutationsrate. Die Mitführung von Entscheidungsvariablen für jeden Zeitschritt erzeugt in ihrer Anwendung also einen sehr hohen Rechenaufwand.

5.3 Datengetriebene Ansätze

Merz et al. (2011b, S. 102) bezeichnen Black-Box-Modelle als „datengetrieben“, da sie ihre Ergebnisse nicht durch analytische Prozessbeschreibung, sondern durch Anpassung von Gewichten in einem Netz künstlicher Neuronen ermitteln, die durch lineare Beziehungen oder Polynome verknüpft sind. „Ihre Vorteile liegen in der Lernfähigkeit und in den sehr kurzen Rechenzeiten auch für komplexe Probleme, ihre Nachteile in der Notwendigkeit eines

aufwändigen Trainings ihrer Netzstruktur sowie einer begrenzten Extrapolationsfähigkeit“. Die beiden folgenden Abschnitte diskutieren die Anwendung datengetriebener Ansätze in der Speicherbewirtschaftung nach Meon und Gocht (2012).

5.3.1 Neuronale Netze

Chandramouli und Raman (2001) kombinierten dynamisches Programmieren mit einem künstlichen neuronalen Netz (KNN), um Abgabedefizite des aus neun Speichern bestehenden Parambikulam-Aliyar Projektes in Südindien zu minimieren. Sie verglichen künstliche neuronale Netze mit einem Regressionsalgorithmus bei der Ableitung effizienter Betriebsregeln aus den umfangreichen Ergebnissen des dynamischen Programmierens. Eine Überprüfung in einem Simulationsmodell ergab, dass das KNN-Ergebnis dem Regressionsansatz überlegen war. Die Ergebnisse von Kongjun und Vudhivanich (2003) für das aus vier Speichern bestehende System im oberen Mun-Einzugsgebiet in Nordost-Thailand stützen diese These mit einer erklärten Variabilität R^2 von 0,96 für das Training und 0,8 bis 0,96 für den Test eines KNN. Othman und Naseri (2011) präsentierten andererseits ein KNN für die Zuflussvorhersage des Sultan Mahmud Wasserkraft-Speichers, welches Spitzenzuflüsse unzureichend vorhersagte. Koutsoyiannis et al. (2001) betonten, dass einfache und effiziente parametrische Optimierung an die Stelle des dynamischen Programmierens treten kann, wenn ein komplexes Simulationsmodell für die Einhaltung der Randbedingungen sorgt. Dölling und Varas (2004) verwendeten diesen Ansatz, indem sie fünf Nutzungsindizes i und drei Leistungsindikatoren j für das Einzugsgebiet des San Juan in Argentinien definierten, deren Bereiche sie in 3 500 Zufallsläufen eines Simulationsmodells ermittelten. Sie trainierten und testeten ein KNN, das sie, wie in Gleichung 6 gezeigt, in die Zielfunktion F_O inkorporierten:

$$F_O = \sum_{i=1}^5 b_i \sum_{j=1}^3 g_{i,j} \left(\frac{\sigma \left(\sum_{n=1}^N w_n n_i \sigma \left(\sum_{p=1}^P w_p X_p \right) \right)}{I_{\max i,j}} \right) \quad 6$$

Ein Optimierungsalgorithmus soll die Zielfunktion F_O für jede Nutzung i , gewichtet mit b , und jeden Leistungsindikator j , gewichtet mit g , minimieren. Sie besteht aus einem Quotienten, dessen Zähler das KNN bildet. Es hat eine Sigmoid-Aktivierungsfunktion σ , einen Eingangsdatenvektor X_p mit Gewichten w_p und eine verdeckten Schicht N . Der Nenner ist die beste Ausprägung I_{\max} des Leistungsindikators j für die Wassernutzung i aus 3 500 Simulationsläufen. Die Autoren stellten nach 50 000 Läufen des Simulationsmodells eine gute Generalisierungsfähigkeit des KNN fest und verwendeten für dessen Optimierung einen auf dem allgemeinen reduzierten Gradientenverfahren (General Reduced Gradient) basierenden Algorithmus, der für der Optimierung erste und zweite Ableitungen benötigt. Dies ist möglich, da die Sigmoidfunktion differenzierbar ist.

Auch andere Kombinationen wurden erprobt. Sedki et al. (2009) kombinierten beispielsweise ein KNN mit einem genetischen Algorithmus zur Niederschlag-Abfluss-Vorhersage auf Tagesbasis.

5.3.2 Stützvektormaschinen

Seit Rumelhart et al. (1986) den Algorithmus der Rückwärtspropagation (back-propagation) einführten, ist ein effizientes Training von KNN mit mehreren Schichten möglich. Sowohl Cybenko (1989) als auch Hornik et al. (1989) erbrachten den Beweis, dass KNN mit nur einer versteckten Schicht universelle Funktionsapproximatoren sind. Jedoch ist ihre Extrapolationsfähigkeit, also die richtige Wiedergabe von im Trainingsdatensatz nicht enthaltenen Zusammenhängen, eine offene Frage, da KNN nur das empirische Risiko minimieren.

Empirisches Risiko ist der Fehler in den Trainingsdaten, die eine zufällig aus einer unbekannten Verteilungsfunktion gezogene Stichprobe darstellen. Erwartetes Risiko (expected risk) ist das Konfidenzintervall einer Lernmaschine (learning machine), eigentlich das Vertrauen, dass die von einer Lernmaschine zurückgegebenen Ergebnisse für Eingangsdaten, die nicht im Training enthalten waren, innerhalb bestimmter Fehlergrenzen liegen. Dies ist eine formale Definition der Generalisierungsfähigkeit. Wenn die gewählte Struktur einer Lernmaschine, die das empirische Risiko minimiert, zu komplex ist, ist das Konfidenzintervall sehr groß. Auch wenn das empirische Risiko null ist, kann das erwartete Risiko groß sein. Dieser Fall schlechter Generalisierungsfähigkeit ist die Folge von Überanpassung (overfitting) eines KNN (Yu et al., 2006, p. 706).

Strukturelle Risikominimierung zielt auf die gleichzeitige Minimierung von strukturellem und erwartetem Risiko in einer Stützvektor-Maschine (Support Vector Machine (SVM)) (Vapnik, 1999). Chen et al. (2011) verglichen Stützvektor-Regression (Regression mit Stützvektormaschinen (SVR)) und KNN im Rahmen der Korrektur von Taifun-Niederschlägen aus Radardaten und stellten fest, dass SVR bessere Ergebnisse lieferte als KNN. Lin et al. (2009) gelang mit SVR eine signifikante Verbesserung der Vorhersage von Speicherzuflüssen im Vergleich zu KNN. SVM und KNN weisen keine Unterschiede in ihrer Struktur auf (Chen und Yu, 2007). Die Interpretation des Gewichts als Anteil, zu dem ein Vektor des Trainingsdatensatz die Regressionsfunktion stützt und ein konsistentes mathematisches Verfahren zur Auswahl dieser Stützvektoren stellt den eigentlichen Unterschied dar.

5.4 Diskussion

Die direkte Optimierung des Talsperrenbetriebs mit einem Wasserhaushaltsmodell ist nach dem Ergebnis der Literaturanalyse dieses Abschnitts nicht möglich. Alle komplexeren Algorithmen benötigen viele Versuche, um ein Optimum zu erreichen. Die Voraussetzung für eine erfolgreiche Anwendung ist also ein sehr effizientes Simulationsprogramm. Im Kapitel 9 dieser Arbeit wird ein Simulationsmodell für die Berechnung der Talsperrenabgabe unter Klimawandeleinfluss vorgestellt. Da es ein vereinfachtes Abbild eines Teilprozesses des Wasserhaushaltsmodells ist, wird dafür die Bezeichnung ‚Metamodell‘ verwendet.

Da für Langzeitkontinuumsimulationen auf Stundenbasis keine Algorithmen verwendet werden können, die für jeden Zeitschritt unterschiedliche Entscheidungsvariablen mitführen, kommt dynamisches Programmieren nicht in Frage. Gradientenverfahren scheiden aus, weil Diskontinuitäten in den Zeitreihen und Randbedingungen erwarten werden. Neuronale Netze kommen wegen fehlender Extrapolationsfähigkeit für Klimawandelsimulationen ebenfalls

nicht in Frage. Als vielversprechender Ansatz wurde in dieser Arbeit eine Stützvektormaschine nach Suykens et al. (2002) auf ihre Fähigkeit hin untersucht, die Abgaben der Sösetalsperre für den Zeitraum 2002 bis 2008 unter Verwendung von Zufluss, Monat und Inhalt als Eingangsgrößen zu simulieren. Bei hohem Rechenaufwand gelang zwar die Wiedergabe der Scheitel, jedoch fielen die Abgaben danach in den negativen Bereich. Dies ist physikalisch nicht sinnvoll, hätte sich vielleicht aber bei einer intensiveren Auseinandersetzung mit dem Ansatz beheben lassen. Es ist allerdings nicht möglich, eine einmal trainierte Stützvektormaschine mit einem geänderten Betriebsregelsatz zu betreiben. Auch hier unterscheiden sie sich nicht von KNN. Die Vorgabe der Betriebsregel ist nur implizit durch Zeitreihen des Monats und Inhalts möglich. Der Ansatz wurde daher nicht weiter verfolgt.

Letztlich verblieb die Verwendung eines populationsbasierten Verfahrens. Da im Ergebnis der Literaturstudie zur Optimierung des Betriebs von Speicherverbundsystemen genetische Algorithmen die derzeit mit bestem Erfolg eingesetzte Strategie sind, lag diese Auswahl nahe. Maximale Effizienz wurde durch Verwendung nur einer Entscheidungsvariablen erreicht. In weiteren Untersuchungen wären auch mehrere Variablen verwendbar. Wesentlich erscheint jedoch, für eine Entscheidungsvariable nur einen Wert, nicht eine Zeitreihe von Werten vorzugeben, da das Mitführen einer Zeitreihe für die Entscheidungsvariable den Rechenaufwand in Langzeitkontinuumsimulationen auf Stundenbasis zu groß werden lässt.

6 Ein neues Verfahren der Expositionsanalyse für die Ermittlung des Hochwasserrisikos

Einerseits wird erwartet, dass der prognostizierte Klimawandel die zukünftige Hochwasserbelastung verschärft. Andererseits motiviert dies eine Anpassung des Talsperrenbetriebs. Beides hat Auswirkungen auf das Hochwasserrisiko. Die vergleichende Bewertung der Auswirkungen setzt eine Quantifizierung des Hochwasserrisikos voraus. Nach der Vorstellung eines vom Autor entwickelten Verfahrens zur Expositionsanalyse folgt daher in diesem Kapitel die Ermittlung des Hochwasserrisikos für die Ortslage Osterode unterhalb der Sösetalsperre. Das Verfahren ermöglicht die Schätzung der Exposition auf Grundlage der Anzahl von Beschäftigten und Anwohnern. Es ist in knapperer Form auch in Gocht (2013b) veröffentlicht. Damit kann die Auswirkung unterschiedlicher Bevölkerungsprognosen und so der Einfluss des demografischen Wandels auf das Hochwasserrisiko abgeschätzt werden. Änderungen des Hochwasserrisikos können Änderungen der Wertschöpfung aus dem Talsperrenbetrieb gegenübergestellt werden. Eine ökonomische Gesamtbewertung wird so möglich.

6.1 Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Hochwasserschutz

Hochwasserschutz stellt als Maßnahme der Daseinsvorsorge ein öffentliches Gut dar: den Schutz gegen schädliche Einwirkungen extremer Abflüsse. Öffentlich ist dieses Gut, da niemand von seiner Nutzung ausgeschlossen werden kann und Rivalitäten bei der Nutzung des Schutzes nicht auftreten. Die Bereitstellung öffentlicher Güter ist die Aufgabe des Bundes, der Länder und der Kommunen.

Die Bundeshaushaltsordnung sieht in §7 Absatz 2 vor, dass für alle finanzwirksamen Maßnahmen des Bundes angemessene Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen durchzuführen sind (BHO, 2009). Daraus wird für Projekte des Bundesverkehrswegeplans die Durchführung von Nutzen-Kosten-Analysen abgeleitet (Birn et al., 2005). Diese Untersuchungen sollen nach Möglichkeit immer auf Marktpreisen beruhen. In Bereichen, in denen solche nicht existieren, müssen andere Methoden zur Anwendung kommen. Eine solche Methode wird in diesem Abschnitt vorgestellt.

Da für öffentliche Investitionen der Länder die Bundeshaushaltsordnung nicht gilt und der Hochwasserschutz vorwiegend Aufgabe der Länder ist, sind Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Hochwasserschutz bisher nicht die Regel. Durch die EU Wasserrahmenrichtlinie (Richtlinie 2000/60/EG) und die EU Hochwasserrichtlinie (Richtlinie 2007/60/EG) gewinnen Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen größere Bedeutung in diesem Bereich. Artikel 6 Absatz 5b der zuletzt genannten Richtlinie fordert bei der Darstellung potenziell negativer Auswirkungen in Hochwasserrisikokarten unter anderem die Angabe der Art der wirtschaftlichen Tätigkeiten. Artikel 7 fordert im Absatz 1 grenzüberschreitende Hochwasserrisikomanagementpläne, die nach Absatz 3 relevante Aspekte, wie etwa Nutzen und Kosten, berücksichtigen sollen. Die Hochwasserrisikoanalyse ermittelt in diesem Rahmen den Nutzen, der durch vermiedene Hochwasserschäden entstehen kann.

6.2 Ermittlung des Hochwasserrisikos

Es ist üblich, das Hochwasserrisiko als Produkt aus Gefährdung und Vulnerabilität des Risikoelementes zu beschreiben. Dieser Abschnitt ist auf direkte und indirekte monetäre Hochwasserschäden im gewerblichen und privaten Bereich fokussiert. Daher bilden Gebäude mit ihren Inhalten die Risikoelemente. Die Gefährdung setzt sich aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Intensität, die Vulnerabilität aus Exposition und Anfälligkeit zusammen. Damit ist für dieses Kapitel zugleich eine geeignete Gliederung gegeben.

In mathematischer Hinsicht wird das Hochwasserrisiko R durch den Erwartungswert des Schadens $E\{D\}$ innerhalb eines Zeitintervalls Δt ausgedrückt (Gleichung 7):

$$R = \frac{E\{D\}}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} \int D f_D(D) dD \quad \left[\frac{\text{Schadeneinheit}}{\text{Zeiteinheit}} \right] \quad 7$$

Dabei ist D die Zufallsvariable Schaden und $f_D(D)$ ihre Dichtefunktion. Das Risiko hat dieselbe Dimension wie der Schaden bezogen auf eine Zeiteinheit. Da sich die Aussagen zu Hochwasserrisiken üblicher Weise auf ein Jahr beziehen, ist die Einheit des Erwartungswertes €/a. Wird die Dichtefunktion des Schadens über eine Anzahl $i = 1 \dots k$ diskreter Schadenereignisse des Schadenumfangs D angenähert, gilt Gleichung 8:

$$R = \sum_{i=1}^k P_i D_i \quad \left[\frac{\text{Schadeneinheit}}{\text{Zeiteinheit}} \right] \quad 8$$

Dabei bezeichnet P_i die Eintrittswahrscheinlichkeit des Schadenereignisses i je Zeiteinheit Δt , also den Kehrwert der Jährlichkeit (Merz, 2006, S. 13). Mit Gleichung 9 wird aus den für die Ereignisse i und $i+1$ ermittelten Schäden ein mittlerer Schaden D_i gebildet.

$$D_i = \left(\frac{D_{i-1} + D_i}{2} \right) \quad 9$$

Dieser wird mit dem in Gleichung 10 gezeigten Absolutwert P_i der Differenz aus den zugehörigen Eintrittswahrscheinlichkeiten gewichtet (DVWK, 1985):

$$P_i = |P_i - P_{i-1}| \quad 10$$

6.2.1 Gefährdung

Als Gefahr wird die Möglichkeit eines Schadens bezeichnet, während der Begriff Gefährdung eine Aussage über die Eintrittswahrscheinlichkeit einschließt. Hochwasserrisikoanalysen behandeln die Überschreitungswahrscheinlichkeit, also die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Hochwasserereignis einer bestimmten Jährlichkeit überschritten wird. Dies ist der in Gleichung 7 enthaltene Kehrwert der Jährlichkeit $1/T$ (Merz, 2006). Daneben transportiert der Begriff Gefährdung eine Aussage über die Intensität des einwirkenden Ereignisses. Dies kann der Wasserstand h , die Fließgeschwindigkeit v oder das Produkt aus Wasserstand und Fließgeschwindigkeit sein. Physikalisch sinnvoll erscheint weiterhin die aus der Gerinnehydraulik geläufige Berücksichtigung der Geschwindigkeit in Form der Energiehöhe E nach Gleichung 11.

$$E = h + \frac{v^2}{2g} \quad [m] \quad 11$$

Nimmt man die Erdbeschleunigung mit $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ an, trägt eine relativ hohe Fließgeschwindigkeit von 1,5 m/s rund 11 cm zur Gesamtenergiehöhe bei. Der Höhenfehler der deutschen Grundkarte 1:5 000 liegt im Flachland bei rund 10 cm, im Bergland darüber. Der Beitrag der Fließgeschwindigkeit zur Energiehöhe übersteigt damit die Höhengenaugkeit guter Höhenmodelle nicht.

Pieroth und Beichert stellten in Thieken et al. (2010) nur in kleinen Bereichen der Ortslagen Döbeln (Freiberger Mulde), Grimma (Mulde) und Eilenburg (Mulde) einen Beitrag der Fließgeschwindigkeit in Höhe von 5 bis 10% der Energiehöhe während des Hochwassers 2002 an der Elbe fest. Angesichts dieser Befunde sollte die Bedeutung der Fließgeschwindigkeit im Rahmen von Risikoanalysen nicht überschätzt werden, auch wenn auf Bildern der Ortslage Wesenstein (Müglitz) aus dem Jahr 2002 die Zerstörungskraft hoher Fließgeschwindigkeiten beeindruckend dokumentiert ist. Die mediale Bedeutung hoher Fließgeschwindigkeiten übersteigt die ökonomische bei weitem. Damit bleibt als wichtigster Parameter der Intensität der Wasserstand, mit Bezug auf das Risikoelement häufig ‚Überflutungshöhe‘ genannt.

6.2.2 Vulnerabilität

Vulnerabilität entsteht nach Merz (2006) aus dem Zusammenwirken Exposition und Anfälligkeit. Umfangreiche Erkenntnisse zu letzterer lieferte das RIMAX-Forschungsprojekt MEDIS (Thieken et al., 2010, Kreibich et al., 2010, Seifert et al., 2010), in dessen Rahmen Telefoninterviews mit 1 697 betroffenen Privathaushalten im Nachgang des August-Hochwassers 2002 an der Elbe durchgeführt wurden. Klassifiziert nach den Faktoren Wasserstand, Gebäudetyp und Gebäudequalität, lieferten die so erhobenen Schäden die Eingangsdaten für die in Abbildung 6-1 rechts gezeigten Schadenfunktionen des privaten Bereichs (mittlere Gebäudequalität). Der obere Teil der Abbildung zeigt Funktionen für Gebäude, der untere die für den Hausrat.

Für die Abschätzung von gewerblichen Schäden werteten Kreibich et al. (2010) 642 Telefoninterviews von Betrieben nach Schäden an Gebäuden, an der Betriebseinrichtung, den Waren, Produkten und Lagerbeständen sowie nach Betriebsunterbrechungen aus. Darüber hinaus wurden Informationen zu Betriebsgröße, Branche und Umsatz, zu Wasserstand und Überschwemmungsdauer sowie zu ergriffenen Vorsorge- bzw. Notmaßnahmen aufgenommen. Die Schadenfälle wurden nach Wasserstand, Wirtschaftssektor und Betriebsgröße klassifiziert und letztere weiter in „klein“ (1 bis 10 Beschäftigte), „mittel“ (10 bis 100 Beschäftigte) und „groß“ (über 100 Beschäftigte) untergliedert. Die Zuordnung der geschädigten Betriebe zu einem von vier Wirtschaftsbereichen erfolgte nach der Wirtschaftszweigklassifikation WZ 2003 (Statistisches Bundesamt, 2003). Die Abbildung 6-1 links zeigt die Schadenfunktionen für den gewerblichen Bereich (mittlere Betriebsgröße), oben für Gebäude und unten für die Betriebseinrichtungen. Im Vergleich der Schadenfunktionen für die beiden Bereiche fällt auf, dass - abgesehen von privaten und öffentlichen Dienstleistungen - der Schädigungsgrad im gewerblichen Bereich sowohl bei Gebäuden als auch bei Inhalten denjenigen im privaten Bereich deutlich übersteigt.

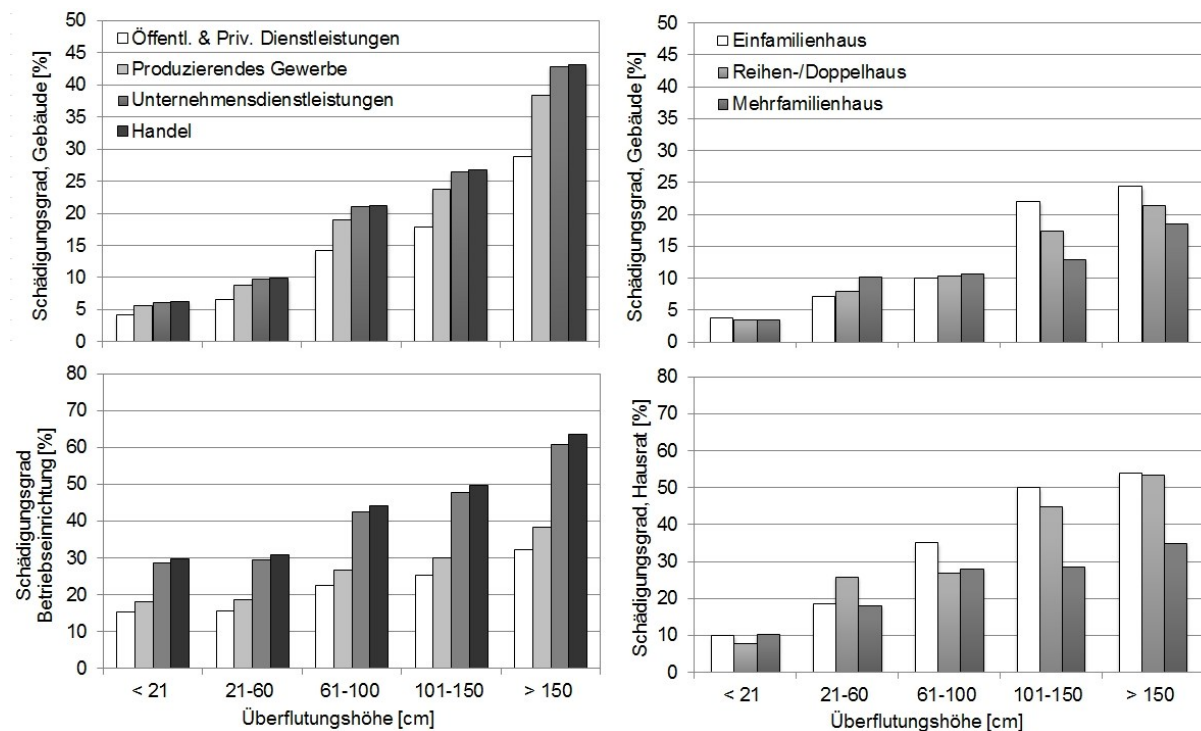


Abbildung 6-1: Mittlere Schädigungsgrade für den gewerblichen und privaten Bereich. Schäden an Gebäuden (oben) und an Betriebseinrichtungen bzw. Hausrat (unten) (Thieken et al., 2010).

Für die Abschätzung von Betriebsunterbrechungsschäden legten Seifert und Kreibich in Thieken et al. (2010) Schadenfunktionen auf Basis der genannten Telefoninterviews vor. Zwar korreliert die Betriebsunterbrechungsdauer auch mit dem Wirtschaftsbereich, die stärkste Korrelation wurde jedoch mit dem Wasserstand festgestellt. Die Werte streuen sehr stark (Abbildung 6-2).

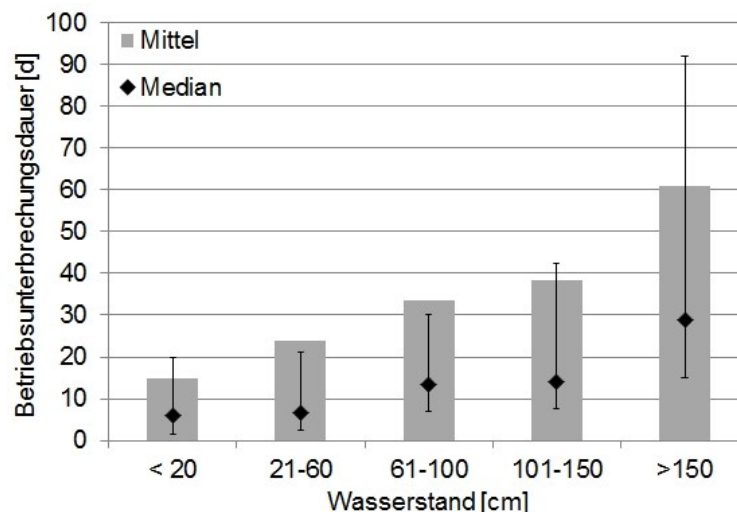


Abbildung 6-2: Dauer der Betriebsunterbrechung in Tagen in Abhängigkeit des Wasserstandes. Mittelwert, Median, sowie 25%- und 75%-Perzentil (Fehlerbalken) nach (Thieken et al., 2010).

In der diesen Abschnitt abschließenden Fallstudie finden die gezeigten Schadenfunktionen Anwendung. Für eine konservative Abschätzung des Betriebsunterbrechungsschadens wird der Median der Abbildung 6-2 verwendet.

Die Exposition, also das Wertinventar, auf das die gezeigten Schadenfunktionen angewendet werden, ist das zentrale Thema dieses Abschnitts. Nach einem Literaturüberblick werden Schwächen vorhandener Ansätze diskutiert und eine neue Methodik für mikro- bis mesoskalige Risikoanalysen entwickelt.

6.3 Volkswirtschaftliche Daten in Hochwasserrisikoanalysen

Der Arbeitskreis volkswirtschaftliche Gesamtrechnung der Länder stellt regelmäßig Daten zur Verfügung, die für die Berechnung des Bruttoinlandsproduktes (BIP) erhoben werden (vgrdl.de). In einem Forschungsbericht an den Bundesminister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (BELF, 1990) verwendeten Klaus und Schmidtke diese Daten erstmals in einer Bewertung von Maßnahmen des Hochwasserschutzes für die Wesermarsch. Sie ermittelten aus den volkswirtschaftlichen Größen und einem Flächenkataster nutzungsspezifische Flächenwerte mit der Einheit €/m². Aus diesen berechneten sie Hochwasserschäden für unterschiedliche Überflutungshöhen mit relativen Schadenfunktionen, die sie aus der von Kleeberg und Niekamp (1998) entwickelten HOWAS-Datenbank ableiteten.

Kiese und Leineweber (2001) verfeinerten diesen Ansatz. Lokale Informationsquellen, eine von ihnen für diesen Zweck erstellte Datenbank, sowie ein Landnutzungskataster dienten ihnen zur Berechnung nutzungsspezifischer Flächenwerte für die Abschätzung des Schadenpotentials.

Die großflächigste Untersuchung auf der Grundlage volkswirtschaftlicher Daten legte die IKSR (2001) mit dem IKSR Rheinatlas vor. Vorhandene Studien lieferten für Deutschland Flächenwerte, gegliedert nach sechs Nutzungen des CORINE-Landnutzungsdatensatzes. Für angrenzende Länder wurden die Werte mittels Kaufkraft- und BIP-Indizes umgerechnet. Aus Flächenwerten und relativen Schadenfunktionen errechnete Schäden stellt der Atlas für Hochwasserereignisse unterschiedlicher Überschreitungswahrscheinlichkeit in Karten dar.

Seifert et al. (2009) legten eine deutschlandweite Regionalisierung volkswirtschaftlicher Daten vor. Sie berechneten für eine tiefe volkswirtschaftliche Gliederung von 60 Wirtschaftszweigen Flächenwerte mit Hilfe zahlreicher statistischer Datensätze und der Landnutzungsdatensätze ATKIS und CORINE und regionalisierten diese auf Ebene der Gemeinden. Sie empfahlen die Verwendung dieser Daten für Nutzen-Kosten-Analysen im Hochwasserschutz.

Die Beispiele zeigen, dass die Nutzung volkswirtschaftlicher Daten in der Expositionsanalyse verbreitet und akzeptiert ist. Allen zitierten Autoren ist jedoch gemein, dass sie volkswirtschaftliche Werte auf Landnutzungsdatensätze verteilen, die nicht mit der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung korrelieren. Das Produkt aus dem so erhaltenen Flächenwert und der Größe der überschwemmten Fläche bildet den Gesamtwert der Fläche. Mit relativen Schadenfunktionen wird daraus in Abhängigkeit des Wasserstandes ein potentieller Hochwasserschaden berechnet.

Dieses flächenorientierte Vorgehen weist vier grundsätzliche Probleme auf:

- Die Fläche eines Betriebes ein schlechter Indikator seines volkswirtschaftlichen Wertes, da große Teile der Betriebsflächen nicht mehr oder noch nicht produktionswirksam sein können.

- Landnutzungsdatensätze wie ATKIS oder CORINE lösen wirtschaftliche Aktivitäten räumlich nur sehr ungenügend auf. Insbesondere bei ATKIS ist aufgrund einer fehlenden Datierung unklar, ob es sich bei der dargestellten Flächennutzung um eine vergangene, gegenwärtige oder geplante Nutzung handelt.
- In topografisch gegliedertem Gelände sind Überschwemmungen lokale, auf vergleichsweise kleine Flächen begrenzte Ereignisse und betreffen daher wenige Betriebe. Nur in großen - wie beispielsweise den im IKS Rheinatlant dargestellt - Überschwemmungsgebieten, in denen das Gesetz der großen Zahl eine Ausmitlelung von Fehlern erwarten lässt, scheint daher die Anwendung der flächenorientierten Methode zielführend. Seifert et al. (2010) empfehlen die Anwendung ihres Modells daher für die Meso- bis Makroskala.
- Das flächenorientierte Verfahren ist für robuste Zukunftsprognosen ungeeignet, da es keine geeigneten Methoden gibt, um die Flächenwerte langfristig in die Zukunft zu extrapolieren.

Daher wird hier ein Verfahren dargestellt, das Vermögenswerte nicht auf Flächen, sondern auf Beschäftigte bezieht. Die Ansätze entstanden im Rahmen des ERANET CRUE-Forschungsprojektes EWASE (Gocht et al., 2009, Schröter et al., 2009). Hierbei wurde die transnationale Anwendbarkeit in Österreich und Spanien gezeigt. Eine erste Anwendung in Deutschland erfolgte im Rahmen des RIMAX-Projektes (Gocht und Meon, 2010).

Eine Expositionsanalyse, die die Exposition auf Beschäftigte bezieht, eignet sich besonders für die Anwendung im Rahmen der Klimafolgenforschung: Die Emissionsszenarien (IPCC, 2000) legen der zukünftigen Entwicklung des CO₂-Ausstoßes Bevölkerungsprognosen zu Grunde. Die Beschäftigtenzahl steht mit der Bevölkerungsentwicklung in einem engen Zusammenhang. Die Lebensarbeitszeit mag in Zukunft durch früheren Berufs- und späteren Renteneintritt etwas steigen. Dies kann aber den erwarteten Rückgang der Beschäftigtenanzahl in einer schrumpfenden Bevölkerung nur zu einem geringen Teil kompensieren. Die hier vorgestellte Methode ist daher eine robuste und einfach nachvollziehbare Vorgehensweise zur Abschätzung gegenwärtiger und zukünftiger Hochwasserrisiken. Dabei wird besonderes Gewicht auf das verarbeitende Gewerbe und den Dienstleistungsbereich gelegt, da viele Untersuchungen die Entstehung des größeren Teils des Hochwasserrisikos in diesen Wirtschaftsbereichen, nicht im Bereich der privaten Wohngebäude, nachweisen (MURL, 2000, Merz und Gocht, 2001, Bronstert, 2004). Die erforderlichen Eingangsgrößen aus der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung werden im Folgenden dargestellt.

6.4 Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung

Die volkswirtschaftliche Gesamtrechnung (VGR) bildet den ökonomischen Kreislauf mittels einer Reihe von Konten ab, die in Zusammenarbeit internationaler Organisationen im „System of National Accounts“ (SNA) (Eurostat et al., 1993) standardisiert wurde. Sie dient der Darstellung eines umfassenden, quantitativen Bildes des Wirtschaftsgeschehens einer Volkswirtschaft für eine abgelaufene Periode und stellt das umfassendste statistische Instrumentarium der Wirtschaftsbeobachtung dar. Das Europäische System der volkswirt-

schaftlichen Gesamtrechnung (ESVG 1995) ist eine Anpassung des SNA an die Erfordernisse der Europäischen Union. Seine Verwendung ist mit der Verordnung 2223/1996/EG in der EU obligatorisch, um eine stetige Vergleichbarkeit der Ergebnisse der VGR zwischen den Ländern sicherzustellen. Auf europäischer Ebene bestimmen die Ergebnisse der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen maßgeblich die Verteilung der finanziellen Mittel aus den EU-Strukturfonds.

Um zentrale wirtschaftliche Indikatoren auch für die Länder, die kreisfreien Städte und die Landkreise zu berechnen, wurde 1954 der deutsche Arbeitskreis „Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen der Länder“ gegründet. Die Ergebnisse der regionalen volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen liefern regionalisierte Informationen über das Wirtschaftswachstum, die Einkommenssituation, den Konsum und die Investitionstätigkeit. Der bekannteste Indikator der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung ist das Bruttoinlandsprodukt, das die Ausgangsgröße für Konjunkturanalysen und -prognosen darstellt. „Mit den Angaben zur Bruttowertschöpfung, zu den Arbeitnehmerentgelten, den Bruttoanlageinvestitionen und zum Anlagevermögen nach Wirtschaftsbereichen sind ... umfassende Produktivitäts- und Strukturanalysen möglich“ (AK VGR, 2010).

6.4.1 Gliederung ökonomischer Aktivitäten

Der Gliederung volkswirtschaftlicher Aktivitäten liegt historisch die Vorstellung eines dreigliedrigen Systems zu Grunde: In einem ersten Sektor werden Rohstoffe gewonnen. Ein zweiter Sektor stellt aus diesen Rohstoffen Produkte her und ein dritter Sektor erbringt mit diesen Produkten Dienstleistungen (Fourastie, 1954). Im ersten Sektor werden heute nur noch Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei zusammengefasst. Der Bergbau wird dem produzierenden Gewerbe und damit dem zweiten Sektor zugeschlagen. Die „International Standard Industrial Classification“ (ISIC) der Vereinten Nationen (2002) unterscheidet in der Revision 3.1 17 Aktivitäten A–Q der Ebene 1. Diese Ebene findet in der vorgestellten Methode Verwendung. Die OECD (2010) bietet in ihrer STAN-Datenbank eine tiefe, auf diesem Standard basierende Wirtschaftszweigklassifizierung für viele Länder zum Zweck vergleichender ökonomischer Analysen an. Die Europäische Union entwickelte 2002 auf der Grundlage der ISIC Revision 3.1 die „Nomenclature générale des activités économiques dans les Communautés Européennes NACE Rev. 1 (Verordnung 29/2002/EG). Diese wird im Allgemeinen alle 5 Jahre durch eine neue Revision aktualisiert. Die Mitgliedsländer der Europäischen Union können NACE für ihre Bedürfnisse anpassen, in Deutschland ist dies die Klassifikation der Wirtschaftszweige (WZ). Die im Folgenden verwendeten Daten beruhen auf der WZ 2003 (Statistisches Bundesamt, 2003), da Angaben zum Anlagevermögen nach der neueren WZ 2008 noch nicht vorliegen. Die Abschnitte A–Q der Ebene 1 werden im Weiteren gemäß internationalem Sprachgebrauch als „Aktivitäten“ bezeichnet. Die Spalten 1 und 2 der Tabelle 6-1 zeigen die den Buchstaben zugeordneten Aktivitäten. Die Aktivitäten P (Haushalte mit Personal) und Q (Exterritoriale Organisationen) spielen eine nur untergeordnete Rolle und werden im weiteren Verlauf nicht betrachtet.

Tabelle 6-1: Aktivitäten und ihre Zusammenfassungen in den unterschiedlichen Eingangsdaten der Expositionsanalyse.

Aktivitäten A - Q		Zusammen- gefasste Aktivitäten	Wirt- schafts- bereiche	Sekto- ren	
A	Land- und Forstwirtschaft	A – B	A – B	A - B	
B	Fischerei				
C	Bergbau, Tagebau	C - E	C – E	C – F	
D	Verarbeitendes Gewerbe	D			
E	Energie- und Wasserversorgung				
F	Baugewerbe	F	F		
G	Handel	G – I	G – I	G - P	
H	Gastgewerbe				
I	Verkehr und Nachrichten				
J	Kredit- und Versicherungsgewerbe	J – K	J – K		
K	Grundstücks- und Wohnungswesen				
L	Öffentliche Verwaltung	L – P	L – P		
M	Erziehung und Unterricht				
N	Gesundheitswesen				
O	Sonstige ö. u. p. Dienstleistungen				
P	Private Haushalte mit Hauspersonal				
Q	Exterritoriale Organisationen				

6.4.2 Geographische Gliederung

Die „Nomenclature of Territorial Units for Statistics“ (NUTS) (Verordnung 1059/2003/EG) wurde im Auftrag der Europäischen Kommission durch Eurostat entwickelt, um eine einheitliche Untergliederung territorialer Einheiten für die Produktion regionaler Statistiken in der Europäischen Union bereitzustellen. NUTS ist ein hierarchisches System mit drei regionalen und zwei lokalen Ebenen. In Deutschland wird die Ebene 1 durch die Bundesländer, die Ebene 2 durch die Regierungsbezirke und die Ebene 3 durch die Kreise dargestellt. Die Abbildung 6-3 zeigt auf der Ordinate die geografische Gliederung, auf ihrer Abszisse ist die ökonomische Gliederung der Tabelle 6-1 wiedergegeben. In den Feldern sind die im Folgenden aufgeführten volkswirtschaftlichen Größen nach ihrer jeweiligen Gliederung angeordnet.

Regionale Gliederung	NUTS 3 Kreis		Erwerbs- tätige	Wert- schöpfung	Zielebene
	NUTS 2 Reg.- Bezirk				
	NUTS 1 Bundes- land	Anlage- vermögen			
	NUTS 0 Land				Erwerbstätige, Wertschöpfung, Anlagevermögen
		Sektoren	Wirtschafts- bereiche	Zusammen- gefasste Aktivitäten	Aktivitäten A - O
Ökonomische Gliederung					

Abbildung 6-3: Eingangsdaten für die Disaggregation des Anlagevermögens und der Erwerbstätigen auf die Zielebene NUTS 3 nach Aktivitäten A-O.

6.5 Die essentiellen volkswirtschaftlichen Größen

6.5.1 Das Anlagevermögen

Das Anlagevermögen wird in Form eines perpetuierenden Inventars jährlich aus den Investitionen und den Abschreibungen errechnet und veröffentlicht. Es wird das die Abschreibungen enthaltende Bruttoanlagevermögen von dem um die Abschreibungen bereinigten Nettoanlagevermögen unterschieden. Die Angabe erfolgt in „Wiederbeschaffungspreisen“. Diese beziehen sich nicht etwa auf den versicherungstechnischen Wiederbeschaffungswert, sondern auf den Preisstand: Wiederbeschaffungspreise sind die Preise im jeweiligen Berichtsjahr. Das Bruttoanlagevermögen in Preisen des Jahres 2000 wird als Kapitalstock bezeichnet. Die Ermittlung der Exposition auf der Grundlage des Bruttoanlagevermögens (zu Wiederbeschaffungspreisen) ergibt einen Schätzwert für den von der Versicherungsbranche verlangten Neuwert. Das Nettoanlagevermögen bildet hingegen den Zeitwert ab. Verwendet man das Bruttoanlagevermögen zur Abschätzung von Hochwasserschäden, so schlägt man den Nutzen von Hochwasserereignissen, die Wertverbesserung bei Wiederherstellung, dem Schaden zu. Das Anlagevermögen wird gegliedert nach Ausrüstungen und Bauten auf der regionalen Ebene NUTS 1 (Länder) nach Sektoren veröffentlicht (Tabelle 6-1, Spalte 5 und Abbildung 6-3, Spalte 1) (AK VGR, 2010).

6.5.2 Die Wertschöpfung

Das Bruttoinlandsprodukt umfasst den Wert aller innerhalb eines Wirtschaftsgebietes während eines Jahres produzierten Waren und Dienstleistungen. Es entspricht der Bruttowertschöpfung aller Wirtschaftsbereiche zuzüglich der Gütersteuern und abzüglich der Gütersubventionen. Die Bruttowertschöpfung ergibt sich aus dem Bruttoproduktionswert zu Herstellungspreisen abzüglich der Vorleistungen zu Anschaffungspreisen (AK VGR, 2011) und misst damit den Beitrag einer Aktivität zur gesamtwirtschaftlichen Leistung. Sie enthält im Gegensatz zur Nettowertschöpfung die Abschreibungen, aber nicht die Steuern. Der Unterschied zwischen Brutto- und Nettowertschöpfung wurde in Abschnitt 2.2.2.3 am Beispiel der Harzwasserwerke GmbH diskutiert. Aus der Angabe der Wertschöpfung pro Arbeitnehmer und Arbeitstag lässt sich schätzen, welche volkswirtschaftlichen Leistungsausfälle im Fall einer Betriebsunterbrechung auftreten. Für Deutschland stellt der Arbeitskreis Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung die Wertschöpfung auf der Ebene NUTS 3 (Kreise) nach zusammengefassten Aktivitäten zur Verfügung (Tabelle 6-1, Spalte 3 und Abbildung 6-3, Spalte 3) (AK VGR, 2011). Im zweiten Sektor werden sowohl die Zusammenfassung C – E als auch D allein angeboten. Im Folgenden wird für die Bruttowertschöpfung der Begriff „Wertschöpfung“ verwendet, wenn auf eine Unterscheidung in das Brutto- und Nettokonzept verzichtet werden kann.

6.5.3 Die Erwerbstätigen

Als Erwerbstätige werden nach der VGR alle Personen angesehen, die innerhalb eines Wirtschaftsgebietes einer Erwerbstätigkeit oder mehreren Erwerbstätigkeiten nachgehen, unabhängig von der Dauer der tatsächlich geleisteten oder vertragsmäßig zu leistenden wöchentlichen Arbeitszeit. Für die hier vorgestellte Methode wird jedoch die Anzahl der Vollzeitbeschäftigten verwendet. Diese werden als Vollzeitäquivalente auf der regionalen Ebene NUTS 2 (Kreise) nach Wirtschaftsbereichen vom Arbeitskreis Erwerbstätigenrechnung der Länder veröffentlicht (AK ETR, 2011). Die Wirtschaftsbereiche fassen die 17 Aktivitäten zu sechs Bereichen zusammen (Tabelle 6-1, Spalte 4 und Abbildung 6-3, Spalte 2).

6.5.4 Die Kapitalintensität

Die Kapitalintensität ist in der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung als der Pro-Kopf-Anteil des Kapitalstocks je Erwerbstätigen eine gut etablierte Größe. Sie misst den durchschnittlichen Kapitaleinsatz je Erwerbstätigen in Preisen des Jahres 2000. Als Quotient aus dem regionalisierten Anlagevermögen und der Anzahl der regionalen Erwerbstätigen wird in der folgenden Fallstudie eine Anlagevermögensintensität zu Wiederbeschaffungspreisen für die Aktivitäten der Ebene A – O auf Kreisebene berechnet. Um dieses Wortungetüm zu vermeiden, wird weiterhin von Kapitalintensität gesprochen.

6.6 Fallstudie Osterode am Harz

Die Talsperren im Westharz dienen als Multifunktionsspeicher auch dem Hochwasserschutz. Andere klimatische Randbedingungen sowie eine veränderte Bewirtschaftung haben einen Einfluss auf das Schutzniveau unterhalb der Talsperren. Sie ändern das Hochwasserrisiko der dort befindlichen Ortslagen. Im Folgenden wird exemplarisch das Hochwasserrisiko für die Ortslage Osterode am Harz wenige Kilometer unterhalb der Sösetalsperre ermittelt. Dem liegt die Annahme zu Grunde, dass eine veränderte Bewirtschaftung nur sehr nahe an den Talsperren einen deutlichen Einfluss auf das Hochwasserrisiko hat. Jedoch schätzt Bodnar (2013) die durch den Hochwasserschutz der Innerstetalsperre bewirkte Wasserstandsminde- rung am rund 45 km entfernten Pegel Heinde vor Hildesheim am 27. Mai 2013 auf über 33 cm. Solche Erfahrungswerte aus aktuellen Ereignissen liegen für die Söse-Talsperre nicht vor. Bereits beim Bau der Talsperre wurde die Söse innerhalb der Ortslage Osterode für ein hundertjährliches Hochwasser ausgebaut.

6.6.1 Anwendung der Expositionsanalyse für die Fallstudie Osterode am Harz

Das durch die vorgestellte Methodik zu lösende Problem ist die grobe Auflösung des Anlagevermögens nach Ländern und Sektoren (Abbildung 6-3). Es muss mit einer geeigneten Hilfsgröße auf Kreise und Aktivitäten disaggregiert werden. Dafür kommen entweder die Wertschöpfung oder die Investitionen in Frage. Beide liegen für die Kreise nach zusammen- gefassten Aktivitäten vor. Mit der STAN Datenbank (OECD, 2010) wurde auf Bundesebene nach Aktivitäten A–O untersucht, welche der beiden Größen enger mit dem Anlagevermögen korreliert ist. Für die Jahresreihe 2002 bis 2008 beträgt der Pearson'sche Korrelationskoeffi- zient des Anlagevermögens mit der Wertschöpfung 97,3%, der des Anlagevermögens mit den Investitionen jedoch nur 38,7%. Besser geeignet ist damit die Wertschöpfung. Auch über die Aktivitäten A–O besteht eine hohe Korrelation zwischen Anlagevermögen und Wert- schöpfung von durchschnittlich 74% für dieselbe Jahresreihe.

Da die Wertschöpfung nach Bundesland und Kreis bekannt ist, kann das Anlagevermögen mit Hilfe der Wertschöpfung anteilig auf die Ebene NUTS 3 nach zusammengefassten Aktivi- täten disaggregiert werden: Es wird dabei die Annahme getroffen, dass ein festes Verhältnis zwischen Wertschöpfung und Anlagevermögen innerhalb eines Sektors besteht (Abbildung 6-4, Schritt 1).

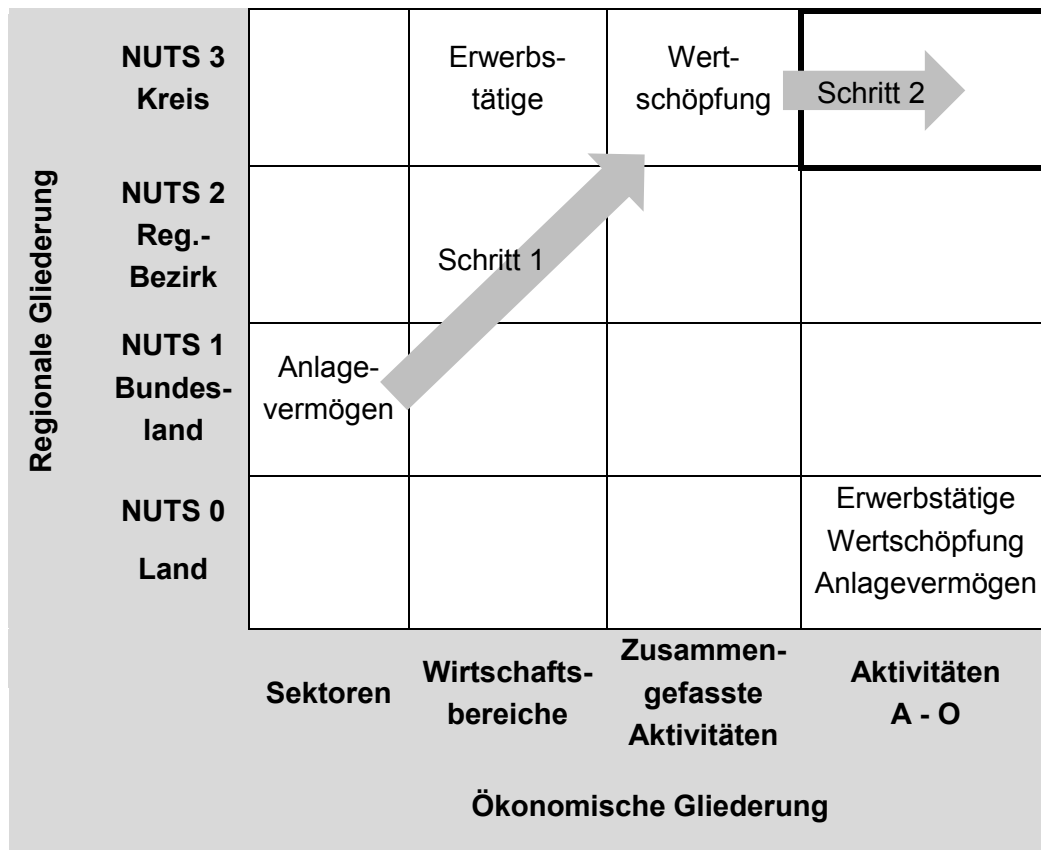


Abbildung 6-4: Disaggregation des Anlagevermögens.

In einem zweiten Schritt muss die Disaggregation der zusammengefassten Aktivitäten in die Aktivitäten A–O erfolgen. Hierzu wird das Anlagevermögen nach Aktivitäten aus der STAN-Datenbank herangezogen. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass die Verteilung der Aktivitäten A–O auf die zusammengefassten Aktivitäten im untersuchten Kreis der bundesdurchschnittlichen entspricht (Abbildung 6-4, Schritt 2).

Die Wertschöpfung je Erwerbstätigem dient auch der Abschätzung von Betriebsunterbrechungsschäden. Da sie bereits auf der Ebene NUTS 3 vorliegt, kann sie mit den Angaben zur Wertschöpfung aus der STAN-Datenbank auf die Aktivitäten A–O disaggregiert werden.

Auch die Erwerbstätigen, deren Anzahl nach Wirtschaftsbereichen vorliegt, können mit Hilfe der zahlenmäßigen Angaben zu Erwerbstätigen aus der STAN-Datenbank auf die Aktivitäten A–O disaggregiert werden. Als Quotient aus Anlagevermögen und Erwerbstätigen einer Aktivität wird die regionale Kapitalintensität, unterschieden nach Ausrüstungen und Bauten, berechnet. Das Ergebnis zeigt Tabelle 6-2 für diejenigen Aktivitäten, die in der durch Hochwasser gefährdeten Fläche in Osterode angetroffen wurden. Die vollständige Tabelle enthält Anhang 1. Die Tabelle 6-3 gibt für dieselben Aktivitäten die Wertschöpfung je Erwerbstätigem und Tag an.

Tabelle 6-2: Kapitalintensitäten in Euro für Ausrüstungen und Bauten im Kreis Osterode für die Jahre 2005 bis 2009. Aktivitäten, die im durch Hochwasser gefährdeten Bereich angetroffen wurden.

Ausrüstungen €					
	2005	2006	2007	2008	2009
A	51.201	55.182	67.794	64.824	75.800
D	49.803	48.764	50.516	45.148	47.674
E	95.259	82.207	85.191	85.315	115.383
F	23.523	22.506	20.981	20.115	22.240
G	9.087	9.215	9.315	9.545	10.014
K	77.668	77.222	65.844	67.596	78.232
O	32.021	31.042	30.790	33.296	37.402

Bauten €					
	2005	2006	2007	2008	2009
A	82.708	88.675	108.445	104.334	114.476
D	43.883	44.152	48.421	44.912	46.184
E	83.936	74.432	81.657	84.868	111.777
F	20.727	20.378	20.111	20.010	21.545
G	90.980	94.889	98.294	100.635	102.267
K	777.599	795.147	694.827	712.681	798.962
O	320.592	319.640	324.914	351.044	381.973

Tabelle 6-3: Wertschöpfung pro Kopf und Tag in Euro im Kreis Osterode für die Jahre 2005 bis 2009. 230 volle Betriebstage pro Jahr. Aktivitäten, die im durch Hochwasser gefährdeten Bereich angetroffen wurden.

Wertschöpfung €/d					
	2005	2006	2007	2008	2009
A	92,88	97,19	134,02	120,66	103,86
D	322,07	337,61	373,42	341,50	295,70
E	598,29	544,62	605,45	611,30	701,80
F	152,12	155,82	155,10	152,15	137,95
G	171,21	180,97	183,31	187,25	184,61
K					
O	258,81	263,54	257,88	270,37	285,62

Von den 15 Aktivitäten der Ebene 1 wird im Allgemeinen nur ein Ausschnitt im durch Hochwasser gefährdeten Bereich angetroffen. Hier bildet Osterode keine Ausnahme. Aus dem ersten Sektor ist die Landwirtschaft (A), aus dem zweiten Sektor das verarbeitende Gewerbe (D), Energie- und Wasserversorgung (E), und das Baugewerbe (F) vertreten. Aus dem Dienstleistungsbereich treten der Handel (G), die Wohnungswirtschaft (K) und private und öffentliche Dienstleistungen (O) hinzu. Das Produkt aus Kapitalintensität und Erwerbstätigen eines Betriebes bildet den Schätzwert für die Exposition.

Eine Zunahme der Wertschöpfung bei gleichzeitiger Abnahme der Zahl der Erwerbstätigen führt zu einer starken Veränderung der Kapitalintensität der Aktivität E im Jahr 2009. Ähnliche starke Veränderungen treten in keiner der weiteren 15 Aktivitäten A – O auf. Die Wohnungswirtschaft K fällt durch außerordentlich hohe Kapitalintensitäten bei den Bauten auf. Dieser Wert ist nicht geeignet, um die Exposition eines Wohngebäudes zu schätzen. Dies ist auch verzichtbar, da ein Markt für Wohnimmobilien besteht. Für den Bereich der privaten Wohngebäude konnten daher Marktpreise ermittelt werden.

6.6.2 Ermittlung der Gefährdung

Brink und Meon (2004) ermittelten auf der Grundlage hundertjähriger Bemessungsniederschläge den Hochwasserabfluss unterhalb der Sösetalsperre mit einer Jährlichkeit T von 100 Jahren. Hierfür nahmen sie an, dass die Talsperre im Vollstau, also bis an die Überlaufkante der Hochwasserentlastungsanlage gefüllt, sei und berücksichtigten nur ihre Seeretention (Abbildung 6-5).

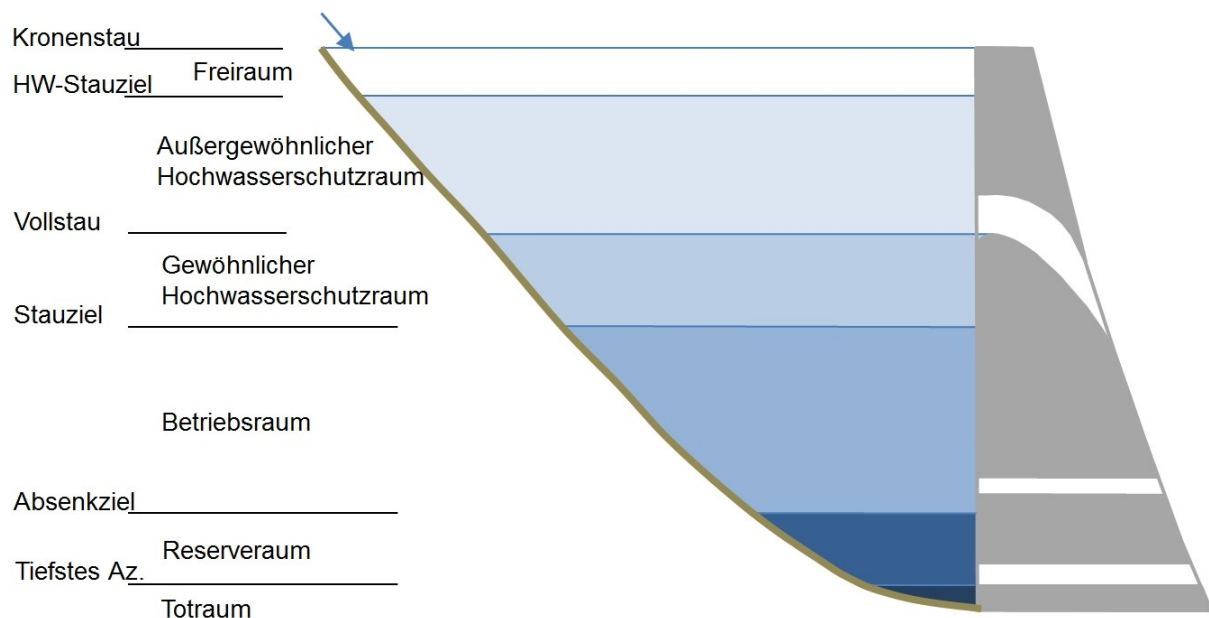


Abbildung 6-5: Bewirtschaftungsräume einer Talsperre nach DIN 19700 (2004) Teil 11.

Für die Ausweisung von Überschwemmungsflächen ist dieses Vorgehen gerechtfertigt, führt jedoch zu einer deutlichen Unterschätzung der Hochwasserschutzwirkung der Talsperre. Dieser - in der Ingenieurhydrologie übliche - Sicherheitszuschlag stellt eine bedingte Wahrscheinlichkeit dar: Das Bemessungshochwasser BHQ3 wird nach DIN 19700 (2004) Teil 11 in der Regel so gewählt, dass ein hundertjährliches Ereignis durch den gewöhnlichen Hochwasserschutzraum der Talsperre zurückgehalten wird. Ein HQ_{100} , das auf eine gefüllte Talsperre trifft, hat daher eine Überschreitungswahrscheinlichkeit $1/T$, die sicher wesentlich geringer ist als 1% pro Jahr. Folgerichtig geht das unter dieser Voraussetzung berechnete Hochwasserrisiko in die Synopse des Kapitels 10 als Nullvariante „ohne Hochwasserschutz“ ein.

Brink und Meon (2004) ermittelten den hundertjährigen Hochwasserabfluss am Pegel Mariental mit $57,4 \text{ m}^3/\text{s}$. Dieser Abfluss bildete die Eingangsgröße für eine vom NLWKN beauf-

tragte Wasserspiegellagenberechnung in der Ortslage Osterode mit einem eindimensionalen hydronumerischen (1DHN-) Modell. Der NLWKN stellte den Längsschnitt und die Lage der Querprofile Lage aus diesem Auftrag zur Verfügung. Hieraus wurde in einem geografischen Informationssystem die Überflutungsfläche für das HQ_{100} ermittelt. In weiten Bereichen stimmt diese Ermittlung mit den festgesetzten Überschwemmungsgebieten gut überein. Einige Bereiche zeigen größere Überschwemmungsgebiete, was auf das für diese Arbeit verfügbare bessere Höhenmodell zurückgeführt wird.

20 Realisationen von WETTREG 2006 für den Zeitraum 1971–2000 bildeten die Grundlage für die Ableitung von Extremwerten am Pegel Mariental oberhalb der Ortslage Osterode. An die Ergebnisse der hydrologischen Berechnung wurde eine dreiparametrische logarithmische Normalverteilung unter Verwendung der Maximum-Likelihood-Methode angepasst und zur Schätzung von Abflüssen über und unter dem bekannten HQ_{100} verwendet. Das Ergebnis zeigt Tabelle 6-4. Gängige Ingenieurpraxis ermittelt das HQ_{1000} als das 1,6-fache des HQ_{100} , für den Pegel Mariental also mit rund 92 m³/s. Verglichen damit sind die gezeigten Werte hoch, wie der letzten Spalte der Tabelle zu entnehmen ist. Aus dem Talquerschnitt am Pegel Mariental konnte unter Annahme einer Fließgeschwindigkeit von etwas mehr als 1 m/s die Abflussfläche nach dem Kontinuitätsgesetz und daraus die Wasserspiegellage in m ü. NN berechnet werden. Diejenige für das HQ_{100} war aus dem 1DHN-Modell bekannt. Für die anderen Abflüsse wurde die sie durch vertikale Verschiebung um den in der vierten Spalte von Tabelle 6-4 gezeigten Betrag ermittelt. Die Überschwemmungsfläche ergab sich durch Extrapolation der Wasserspiegellage in die Fläche. Von Wehren und Brücken verursachte Unstetigkeiten im Höhenverlauf wurden bei Abflüssen größer als HQ_{100} geglättet.

Tabelle 6-4: *Eingangsdaten für die Schätzung von Überflutungsflächen extremer Überschreitungswahrscheinlichkeit für den Pegel Mariental, Osterode am Harz.*

HQ_T	Q [m ³ /s]	WSP		* HQ_{100}
		[m ü. NN]	ΔWSP	
HQ_{20}	15,23	266,60	-1,19	0,27
HQ_{25}	18,69	266,73	-1,06	0,33
HQ_{50}	33,64	267,37	-0,42	0,59
HQ_{100}	57,40	267,79	0,00	1,00
HQ_{200}	82,67	267,90	0,11	1,44
HQ_{500}	104,23	268,11	0,32	1,82
HQ_{1000}	120,93	268,19	0,40	2,11

Als größtes schadenfreies Ereignis wurde das HQ_{20} ermittelt. Damit waren die beiden die Gefährdung bestimmenden Faktoren, Überschreitungswahrscheinlichkeit und Intensität, für jeden Punkt des Untersuchungsgebietes bekannt.

Das beschriebene Vorgehen ist sicher pragmatisch, aber praxisnah. Berechnungen mit einem zweidimensionalen hydronumerischen Modell für zumindest ein weiteres sehr seltenes Ereignis wären wünschenswert, liegen aber selten vor. Die Berechnung eines 1,3-fachen HQ_{100} für hochwassergefährdete Bereiche erfolgt im Rahmen der Umsetzung der EU-Hochwasserrichtlinie durch den NLWKN.

6.6.3 Ermittlung der Vulnerabilität

Die für die Ermittlung der Vulnerabilität wesentlichen Grundlagen wurden in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben. Die Anfälligkeit liefern die Schadenfunktionen des Abschnitts 6.2.2. Für die Ermittlung der Exposition aus der Kapitalintensität musste die Zahl der Beschäftigten der durch Hochwasser gefährdeten Betriebe ermittelt werden. Eine Bereisung vermittelte daher einen Eindruck von den topografischen Verhältnissen und den Betrieben. Unverzichtbar waren Kartendienste im Internet, da dort größere Betriebe nach Namen und Lage aufgeführt sind. Sie geben häufig in ihren Internetauftritten die Zahl ihrer Beschäftigten an. Nur ausnahmsweise mussten für kleine Betriebe auf einem Fragebogen basierende Interviews durchgeführt werden. Dabei stellte sich heraus, dass die Talsperre wenige Kilometer oberhalb im Risikobewusstsein der Befragten keine Rolle spielt.

Mit den Ergebnissen dieser Erhebungen und den in Tabelle 6-2 und Tabelle 6-3 gezeigten Werten für das Jahr 2009 konnte die Exposition im gewerblichen Bereich berechnet werden.

Da die Kapitalintensität der Aktivität K (Grundstücks- und Wohnungswesen) für private Wohngebäude nicht verwendbar ist, wurden Stichproben von 25 Immobilien- und 14 Grundstückspreisen aus Immobilienbörsen des Internets ermittelt. Daraus ergab sich ein um den Grundstückspreis bereinigter Marktwert eines durchschnittlichen Gebäudes mit einer Wohnfläche von 150 m² von 80 000 €. Für die Risikoanalyse wurde ein Wert von 100 000 € angenommen.

Deutsche Versicherer berechnen den Versicherungswert des Hausrats in der Regel auf der Basis eines Pauschalbetrags von 650 €/m². Der Neuwert des Hausrats beträgt für das oben beschriebene durchschnittliche Wohngebäude damit 97 500 €. Für die Risikoanalyse wurde der Zeitwert des Hausrats mit rund 60% des Neuwerts oder 60 000 € angenommen. Damit sind alle Eingangsgrößen für die Risikoanalyse beschrieben.

6.6.4 Hochwasserrisiko in Osterode am Harz

Die Fließstrecke der Söse von der Talsperre bis zum Ortsausgang von Osterode beträgt rund 9,5 km. Sie lässt sich in drei Bereiche gliedern:

Der 2,5 km lange Bereich zwischen Talsperre und Ortseingang ist nur sehr dünn besiedelt. Die Überschwemmungsflächen für das extrem gewählte HQ₁₀₀₀ dieser Fallstudie sind räumlich sehr begrenzt und weisen eine Breite von maximal 150 m auf. Abgesehen von einer Wehranlage befinden sich keine Bauwerke in der Überschwemmungsfläche.

Auf den 3 km vom Ortseingang bis zum unteren Ende des alten Ortskerns verläuft die Söse in einem etwa 15 m breiten und rund 2 m tiefen Rechteckquerschnitt. Dieser führt das HQ₁₀₀₀ dieser Untersuchung sicher und schadenfrei ab.

Auf den weiteren 4 km bis zum Ortsausgang uferf die Söse aus. Die Breite der Überschwemmungsfläche beträgt in großen Bereichen über 200 m und erreicht in der Nähe des Ortsausgangs bis zu 400 m. Diesen Bereich gibt die Abbildung 6-6 in nicht genordeter Darstellung wieder.

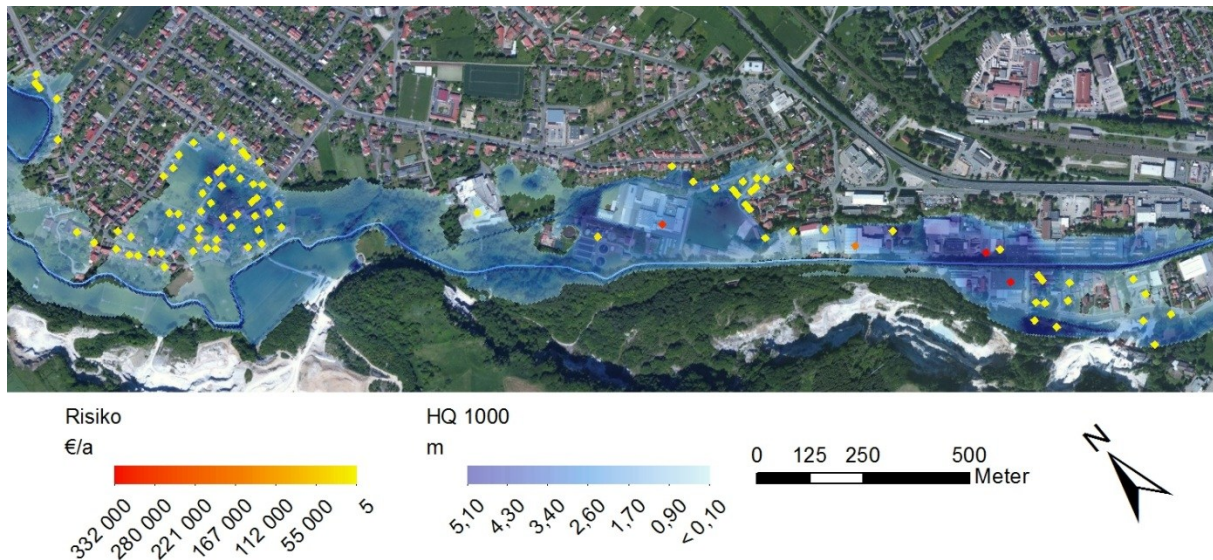


Abbildung 6-6: Risikokarte Osterode am Harz. Geschädigte Objekte sind mit Rauten gekennzeichnet, deren Farbe ein Maß für das Risiko ist. Angaben unter Vernachlässigung der Hochwasserschutzwirkung der Talsperre.

Die rechten zwei Drittel der Abbildung zeigen fast ausschließlich Risiken im gewerblichen Bereich, während im linken Drittel zahlreiche kleine Risiken des privaten Bereichs vorherrschen. Ein Großrisiko wird auf rund 300 000 €/a geschätzt, ein weiteres auf rund 200 000 €/a. Tabelle 6-5 zeigt die Risiken im Vergleich der Jährlichkeiten. Das Gesamtrisiko von rund 787 000 €/a entsteht zu 65% aus den Ereignissen HQ₂₀ bis HQ₁₀₀. HQ₁₀₀ bis HQ₂₀₀ tragen weitere 17% zum Risiko bei, nur die letzten 18% stammen aus den Ereignissen größer HQ₂₀₀. Den überwiegenden Beitrag zum Risiko liefern damit die häufigeren Ereignisse.

Die große Mehrzahl der Risiken entsteht im privaten Bereich, dennoch stellen zwei Großrisiken des gewerblichen Bereichs 76% des Gesamtrisikos. Hier tragen die Ausrüstungen 52% zum Risiko bei. Wegen der Dominanz der gewerblichen Risiken übersteigt das Ausrüstungsrisiko das Gebäuderisiko. Das vorsichtig geschätzte Risiko aus Betriebsunterbrechung trägt mit 14% den kleinsten Anteil bei. Schäden aus Betriebsunterbrechungen spielen im Hochwasserrisikomanagement aber eine Sonderrolle, da sie nicht nur bei Hochwässern, sondern auch bei falscher Vorwarnung entstehen.

Tabelle 6-5: Risiken in €/a für Gebäude, Ausrüstungen und Betriebsunterbrechung in Osterode am Harz.

	Gebäude	Ausrüstungen	Betriebsunterbrechung	Summe
HQ ₂₀ - 50	87.593	159.127	40.893	287.613
HQ ₅₀ - 100	74.600	118.469	31.277	224.346
HQ ₁₀₀ - 200	49.200	68.685	18.978	136.863
HQ ₂₀₀ - 500	37.897	46.822	15.326	100.045
HQ ₅₀₀ - 1000	14.953	17.048	6.205	38.206
Summen	264.243	410.151	112.678	787.072

Die gezeigten Zahlen stellen eine qualifizierte Schätzung dar, die nicht an echten Schadenfällen plausibilisiert werden konnte. Sie beziehen sich auf den Preisstand 2009. Legt man den Preisstand 2005 zu Grunde, fallen die berechneten Risiken um rund 7 % geringer aus.

6.7 Diskussion

Hochwasserschutz und Hochwasserrisikomanagement als Güter der öffentlichen Daseinsvorsorge stehen in Konkurrenz zu anderen öffentlichen Gütern wie beispielsweise Bildung und Gesundheit. Eine Vergleichbarkeit im gesamtgesellschaftlichen Kontext ist dann möglich, wenn, wie hier gezeigt, die Bewertung auf volkswirtschaftlichen Daten aufbaut. Die dargestellte Methode ist einfach nachvollziehbar und kostengünstig. Sie vermeidet Allokationsfehler flächenorientierter Verfahren durch eine objektscharfe Betrachtung. Der damit verbundene Mehraufwand begrenzt die Anwendung des Verfahrens auf den mikro- bis mesoskalierten Bereich, also einige Ortslagen bis hin zu wenigen Kreisen. Dafür sind die Ergebnisse am Objekt verifizierbar. Damit ist das vorgestellte Verfahren eine geeignete Maßnahme, um im Rahmen des Risikomanagements mit Akteuren einen Diskussionsprozess zu eröffnen und die bestehenden Maßnahmen des Risikomanagements (ggf. Versicherung) mit den erforderlichen (ggf. Objektschutz) abzugleichen. Die Quantifizierung erlaubt auch einen Diskurs über die Aufteilung des Risikos auf öffentliche und private Träger.

Die gezeigten Beträge müssen als Nachweis der prinzipiellen Möglichkeit der Ermittlung interpretiert werden, keinesfalls als belastbare Zahlen für wasserwirtschaftliche Planungen. Die verwendeten Schadenfunktionen sind statistisch gut abgesichert. Die Abschätzung der Exposition ist jedoch pauschal und muss zumindest für die Großrisiken validiert werden. Ein Vergleich der Anlagevermögen der vier Betriebe in Osterode, die über 80% des Gesamtrisikos ausmachen, mit den aus Kapitalintensität und Beschäftigtenanzahl berechneten Schätzwerten würde für eine Plausibilisierung der Wertermittlung hinreichen.

Dennoch stimmt die volkswirtschaftliche Perspektive des Ansatzes mit der Entscheidungsebene überein. Da die Methodik nicht nur in Deutschland, sondern auch in anderen Mitgliedsländern der Europäischen Gemeinschaft eingesetzt werden kann, ist sie prinzipiell für das Risikomanagement nach der EU Hochwasserrichtlinie geeignet. Letztendlich gilt, dass auch Hochwasserrisikoanalysen selbst unter einem Wirtschaftlichkeitsvorbehalt stehen. Dem trägt der vorgestellte Ansatz Rechnung. In dieser Arbeit ist jedoch die Tatsache von besonderer Bedeutung, dass durch die Ermittlung der Exposition auf der Grundlage der Anzahl von Beschäftigten und Anwohnern der Einfluss des demografischen Wandels auf das Hochwasserrisiko abgeschätzt werden kann.

7 Aufbau eines Wasserhaushaltsmodells für die Optimierung des Talsperrenbetriebs

7.1 Modellerstellung

Bevor ein Wasserhaushaltsmodell betrieben werden kann, sind umfangreiche Vorarbeiten zur Erstellung desselben erforderlich. Die Ausführung erfolgt zweckmäßiger Weise in einem geografischen Informationssystem, in dieser Arbeit kam ESRI ArcGis in den Versionen 9 und 10 zum Einsatz.

Größere Gewässer gliedern das Untersuchungsgebiet in Teileinzugsgebiete, die anhand von kleineren Zuflüssen weiter in Teilflächen differenziert werden. Hydrotope unterteilen die Teilflächen mittels Landnutzung und Bodenart. Die hydrologische Berechnung erfolgt in PANTARHEI auf Ebene der Hydrotope und wird je Berechnungsschritt auf Teilflächen und Einzugsgebiete aggregiert.

Unverzichtbar für die Untergliederung eines Einzugsgebietes ist ein digitales Höhenmodell (DHM). Ein auf Daten der „Shuttle Radar Topography Mission“ (SRTM) basierendes Höhenmodell wurde vom Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau (WAWI) der Leibniz Universität Hannover im Rahmen der Verbundforschungsvorhaben KLIFWA und KLIBIW bereitgestellt (Meon et al., 2012, Haberlandt et al., 2012). Aus dem DHM können Gewässernetz und Teilflächen automatisiert abgeleitet werden. Jedoch führt dies nur zu einer ungefähren Übereinstimmung der Lage der automatisch erzeugten Gewässer mit derjenigen der tatsächlichen Gewässer in der Landschaft. Auch weichen automatisch erzeugte Teilflächen von vorhandenen Untergliederungen ab.

Für diese Arbeit war eine Verfeinerung der hydrografischen Karte Niedersachsen gefordert. Dies gelang durch Auswahl höher aufgelöster automatisch generierter Teilflächendatensätze und deren Anpassung an die hydrografische Karte. Neben dem Höhenmodell und der hydrografischen Karte fand das Gewässernetz des NLWKN Verwendung. Die genaue Übereinstimmung des im Folgenden ‚Südallermodell‘ genannten Wasserhaushaltsmodells mit der hydrografischen Karte Niedersachsen ermöglicht in Zukunft eine nachhaltige Nutzung.

7.1.1 Hydrografische Karte Niedersachsen

Die „hydrographische Karte für Niedersachsen“ ist eine kartografische Darstellung der Wasserscheiden und Niederschlagsgebiete. In den dazugehörigen Flächenverzeichnissen ist die Größe der einzelnen Niederschlagsflächen aufgelistet. Im Jahr 1893 veröffentlichte das Preußische Ministerium für Landwirtschaft, Domänen und Forsten die „Wasserkarte der Norddeutschen Stromgebiete“. 1933 gab die Königlich Preußische Landesanstalt für Gewässerkunde in Berlin Richtlinien für eine im Maßstab 1:200 000 geplante Karte heraus. 1938 begann die Herstellung der „hydrographischen Karte für Niedersachsen“ nach diesen Richtlinien, eine Veröffentlichung erfolgte kriegsbedingt jedoch erst 1961 durch Brüning und Uhden

(1961). Neue Richtlinien für Gebietsbezeichnungen beschloss 1970 die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, die in einer 1983 herausgegebenen Überarbeitung Berücksichtigung fanden (NMELF, 1983). Eine erneute Änderung der Richtlinien für die Gebiets- und Gewässerverschlüsselung wurde 2005 von der Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser gebilligt (LAWA, 2005).

Die hydrografische Karte in der Ausgabe von 1983 besteht aus 127 Blättern der Topographischen Karte 1:50 000 und dem Flächenverzeichnis mit einer beigefügten Übersichtskarte im Maßstab 1:500 000. Sie basiert auf der Topographischen Karte 1:25 000, der hydrografischen Karte von 1961 sowie weiteren Flächenverzeichnissen. Die in dieser Ausgabe umgesetzten Richtlinien für Gebietsbezeichnungen der LAWA von 1970 behalten das 1933 festgelegte Schema im Wesentlichen bei.

Siebenstellige Gebietskennziffern (GKZ) ordnen die Niederschlagsgebiete. Die erste Stelle der Kennzahl bezeichnet das Stromgebiet. Seit 1970 trägt das Wesergebiet die Nummer 4 (NMELF, 1983). Die zweite Stelle der Kennzahl gibt die weitere Unterteilung des Niederschlagsgebietes an. Beim Quellgebiet mit der Ziffer 1 beginnend, werden bis zur Mündung neun Teilniederschlagsgebiete festgelegt. Nebengewässer erhalten hierbei die geraden Ziffern 2, 4, 6 und 8 und die Zwischengebiete die ungeraden Ziffern 3, 5, 7 und 9. Die Aller trägt die Ziffer 8. Die weiteren Stellen der Kennzahlen unterscheiden die Teilgebiete nach den vorgenannten Grundsätzen. Die unterteilende Wasserscheide kann auch von einem anderen Punkt (Brücke, Pegel, Grenze) ausgehen, wenn das zweckmäßiger ist. Das unterste Zwischengebiet erhält die Nummer 9. Bei kleinen Teilniederschlagsgebieten an der vierten bis siebten Stelle können die Ziffern 8 und 7 oder auch noch weitere Ziffern ausgelassen werden (NMELF, 1983).

Seit den Neunzigerjahren liegt die hydrografische Karte in elektronischem Format vor. Die Unterteilung der Einzugsgebiete ist gemäß der Richtlinie für die Gebiets- und Gewässerverschlüsselung (LAWA, 2005) vorgenommen worden. Die Karte entstand durch Digitalisierung der fortgeschriebenen hydrografischen Karte von 1983 (1:50.000). Es erfolgte eine Abstimmung mit dem aktuellen Fließgewässernetz (Basis-DLM, ca. 1:10.000) und eine Anpassung an bekannte aktuelle Geometrien, beispielsweise Deichlinien.

7.1.2 Teilgebiete und Teilflächen

Der Modellaufbau folgte der vom NLWKN für die Umsetzung des Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EG) vorgenommenen Einteilung des Allereinzugsgebietes in Bearbeitungsgebiete ungefähr gleicher Größe. Vom Harz ausgehend, wurden für das Südallermodell die in Abbildung 7-1 schraffierten Einzugsgebiete neu aufgeteilt. Dies sind obere Leine, Rhume, Leine-Ilme, obere Oker und Innerste. Damit ist das Südallermodell wesentlich größer als der eigentliche Harz. Es umfasst einen wesentlichen Teil des Versorgungsgebiets des Talsperrenbetreibers. Das grau umrandete Westharzmodell fand bei der Modellierung des Talsperrenbetriebs Verwendung. Es umfasst den Westharz und einen kleineren Teil des Harzvorlandes.



Abbildung 7-1: Das Einzugsgebiet der Aller mit den Bearbeitungsgebieten nach der Wasserrahmenrichtlinie. Schraffiert sind die Teilgebiete des Südallermodells dargestellt, der Umriss des Westharzmodells ist ebenfalls gezeigt.

Die automatische Generierung von Teilflächen ist kein Neuland, eine Herausforderung war jedoch, die Neueinteilung so zu automatisieren, dass die Grenzen der hydrografischen Karte erhalten blieben. Gewässernetze lassen sich aus Höhenmodellen in beliebiger Auflösung ableiten, sie stimmen mit den tatsächlichen Gewässernetzen aber selten überein, da die für die Quellbildung mit verantwortlichen hydrogeologischen Verhältnisse des Untergrundes unberücksichtigt bleiben. Weil jede Teilfläche definitionsgemäß ein Gewässer haben muss, begrenzt die Auflösung des Gewässernetzes die Auflösung der Teilflächen. Vorarbeiten am Gewässernetz waren damit unverzichtbar.

7.1.3 Überarbeitung des Gewässernetzes

Grundlage für die Verfeinerung war ein möglichst hoch aufgelöstes Gewässernetz. Während in Randgebieten außerhalb Niedersachsens die topografische Karte 1:50 000 herangezogen werden konnte, fand im Bereich Niedersachsens das vom NLWKN bereitgestellte digitale Gewässernetz in Verbindung mit der topografischen Karte 1:25 000 (TK25) Verwendung: Alle auf der TK25 dargestellten Gewässer wurden in das Gewässernetz aufgenommen, im Bereich von Ortslagen mussten zahlreiche Verrohrungen nachmodelliert werden.

7.1.4 Automatisierte Generierung von Teilflächen

Um bei der automatischen Generierung von Teilflächen die Grenzen der hydrografischen Karte möglichst genau zu treffen und dem bearbeiteten Gewässernetz Priorität zu verschaffen, wurden die Teilflächengrenzen der hydrografischen Karte im Höhenmodell um 5 Meter erhöht, die Gewässerläufe um 3 Meter eingetieft. Die Generierung der Teilflächen erfolgte mit der Software TOPAZ von Riedel (2004), einer Umsetzung des Algorithmus nach Martz und Garbrecht (1993). Abbildung 7-2 zeigt eine 2,4 km² große, so generierte Teilfläche mit ihren Elementen in den Grenzen der entsprechenden Teilfläche der hydrografischen Karte Niedersachsen.

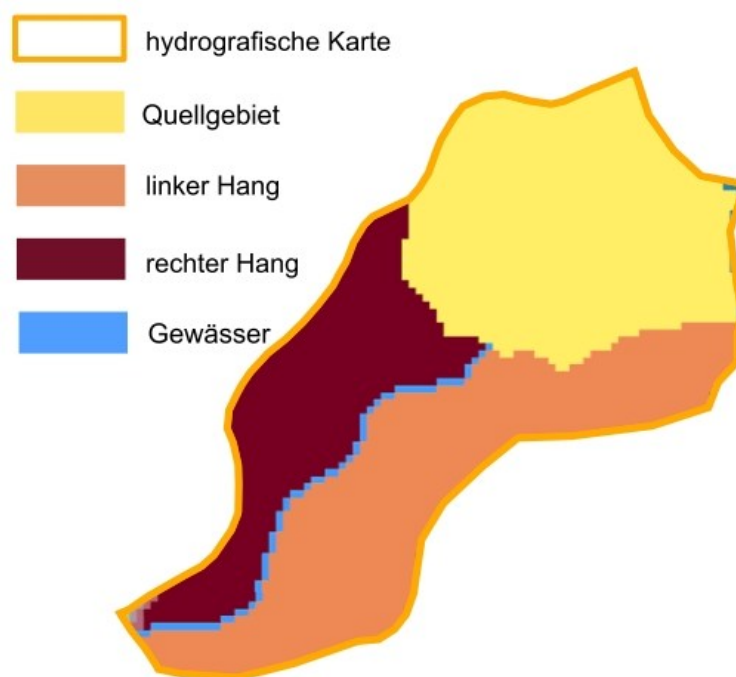


Abbildung 7-2: Eine mit dem Algorithmus nach Martz und Garbrecht (1993) automatisch generierte Teilfläche mit ihren Untergebieten und die entsprechende Teilfläche der hydrografischen Karte.

Selten stimmt eine automatisch generierte Teilfläche so gut mit den Grenzen der hydrografischen Karte überein. Die generierte Fläche ist in vier Untergebiete unterteilt. Das Quellgebiet ist gelb, der linke und rechte Hang in Brauntönen und das Gewässer blau dargestellt. Die Auflösung steuern zwei extern vorgegebene Parameter: die für die Generierung einer Teilfläche mindestens erforderliche Gewässerlänge sowie die mindestens erforderliche Größe des Quellgebiets. Im Beispiel der Abbildung 7-2 betragen die Werte für die Gewässerlänge

200 m und für die Quellgebietsgröße 100 ha. Die tatsächliche Länge des abgebildeten Gewässers beträgt 1,8 km, die Größe des Quellgebiets 97 ha.

Die Teilflächengrößen der hydrografischen Karte variieren stark. Im Allgemeinen weisen Mittelgebirge kleinere Flächengrößen auf als das Tiefland, in Ausnahmefällen finden sich aber auch im Tiefland sehr kleine Flächen. Die Fläche der kleinsten Teilfläche im Einzugsgebiet der Rhume beträgt 0,4 km² (GKZ 4882831), die der größten 62,9 km² (GKZ 4882411). Eine mittlere Teilflächengröße von 2 km² war Ziel der Neueinteilung, kleinere Teilflächen sollten erhalten bleiben. Dem diene die Erzeugung von 6 Teilflächendatensätzen je Bearbeitungsgebiet. Die unterschiedlichen dabei zum Einsatz gekommenen Steuerparameter sind in Tabelle 7-1 dargestellt.

Tabelle 7-1: Parameter zur Generierung sechs unterschiedlicher Teilflächendatensätze.

Datensatz Nr.	Min. Gewässer- länge L [m]	Min. Quell- gebiet A [ha]
1	1000	400
2	500	200
3	200	100
4	100	50
5	50	50
6	50	10

Aus diesen Datensätzen wurde für jede Teilfläche der hydrografischen Karte derjenige ausgewählt, der dem überarbeiteten Gewässernetz am besten entsprach.

Das Vorgehen veranschaulicht die Abbildung 7-3. Oben links sind in der Teilfläche 48828 der hydrografischen Karte (Söse, Einzugsgebiet der Rhume, nordöstlich von Osterode) das überarbeitete Gewässernetz sowie die automatische generierten Datensätze dargestellt. Gröber aufgelöste Datensätze verdecken die feiner aufgelösten. Oben rechts ist der dritte Datensatz 3 (L: 200, A: 100) auf dem Hintergrund der topographischen Karte 1:25 000 dargestellt, da er dem Gewässernetz am besten entspricht. Am südlichen Rand der Teilfläche sind Teile der Ortslage Osterode am Harz zu erkennen. Der Datensatz 3 hält die Grenzen der hydrografischen Karte gut, jedoch nicht genau ein. Weiterhin enthält er Teilflächen der Größe einer Rasterzelle des DHM. Diese Fehler wird mit einem ‚ArcGis-model‘ behoben, sodass sich schließlich das in Abbildung 7-3 unten gezeigte Bild ergibt. Die neuen Teilflächen halten die Grenzen der hydrografischen Karte genau ein und unterteilen die ursprünglich 12,9 km² große Teilfläche in 9 neue Teilflächen mit Flächengrößen zwischen 0,8 und 2,1 km².

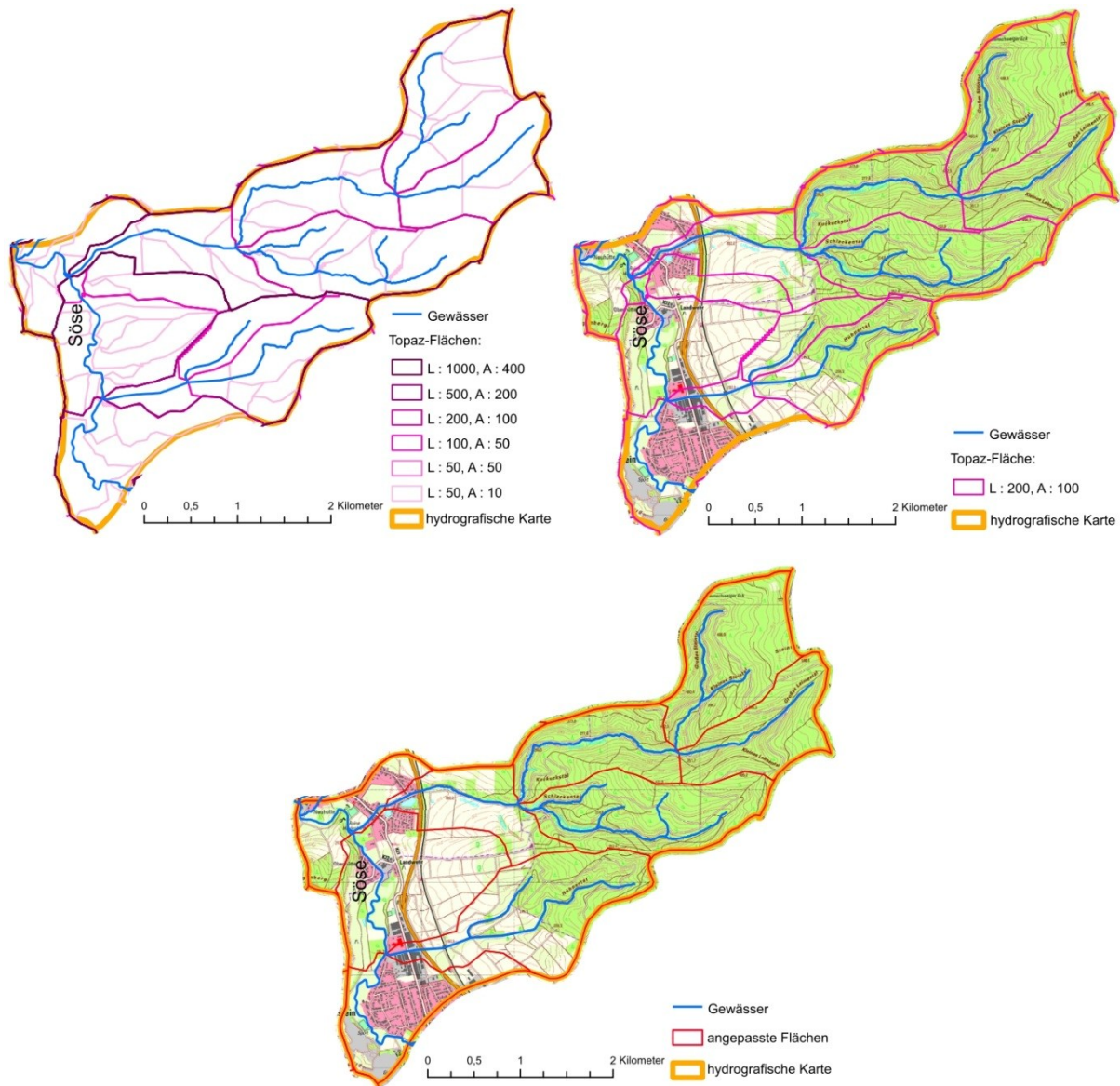


Abbildung 7-3: Halbautomatische Teilflächengenerierung: Oben links: Teilfläche der hydrografischen Karte mit automatisch generierten Teilflächendatensätzen. Oben rechts: der am besten zum verfeinerten Gewässernetz passende Datensatz. Unten: die verfeinerten Teilflächen.

„ArcGIS-models“ ermöglichen die Automatisierung sich oft wiederholender Arbeitsschritte. Abbildung 7-4 zeigt ein für die Anpassung der Teilflächen aufgebautes Modell. Die Eingangsdaten sind blau, die Prozessschritte gelb und die Zwischenergebnisse grün dargestellt: In der hydrografischen Karte muss eine Teilfläche ausgewählt sein. Für diese Teilfläche werden im ersten Schritt aus dem ausgewählten generierten Datensatz die betroffenen Teilflächen ausgewählt (Select Layer by Location). Im zweiten Schritt werden sie auf die Grenze der Teilfläche der hydrografischen Karte beschnitten (Clip). Dabei können Multipart-Features entstehen (Polygone, die nicht zusammenhängen, aber als ein einziges betrachtet werden). Diese Features müssen in einzelne Polygone zerlegt werden (Multipart to Singlepart). Eine Berechnungstabelle wird erzeugt (Make Feature Layer), in der die Fläche der Polygone neu berechnet wird (Calculate Field). Aus der Tabelle werden alle Teilflächen kleiner 0,1 km² ausgewählt (Select Layer by Attribute). Diese Kleinstflächen werden mit der größten angrenzenden Teilfläche verschmolzen (Eliminate). So entsteht das in Abbildung 7-3 unten darge-

stellte Ergebnis. Im Laufe der Bearbeitung die neu erzeugten Teilflächen in einem Teilflächendatensatz zusammengeführt.

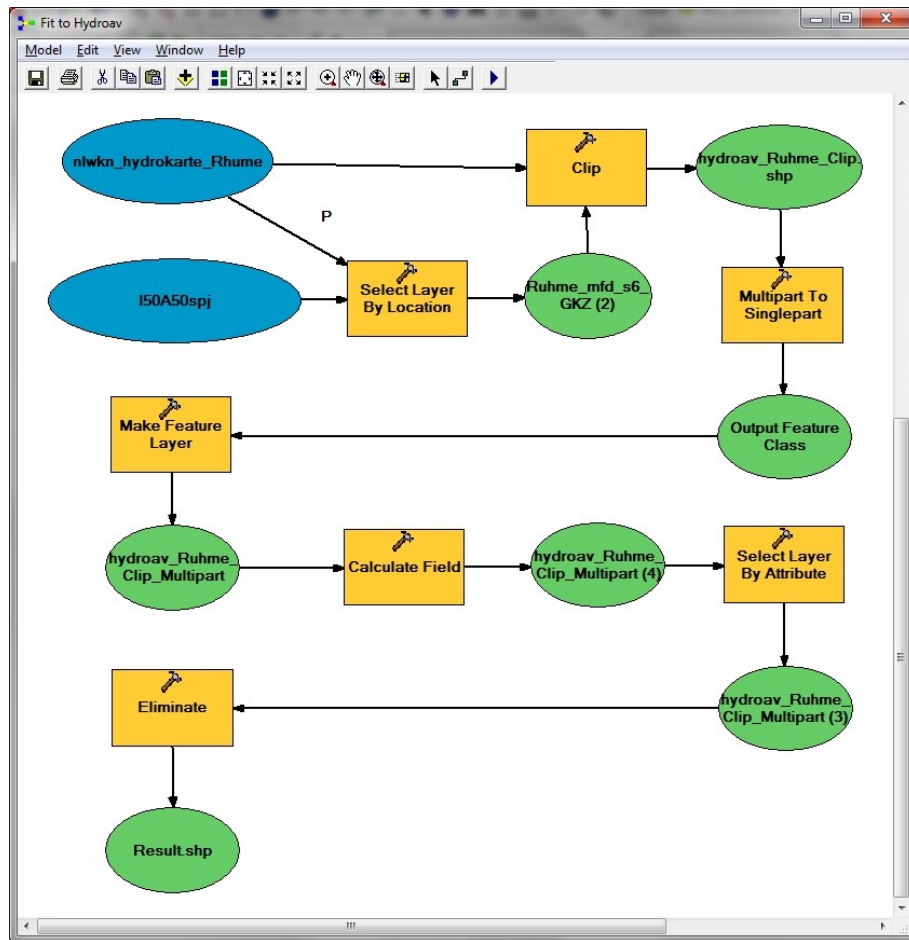


Abbildung 7-4: 'ArcGis-model' zur halbautomatisierten Anpassung von Teilflächendatensätzen an die hydrografische Karte.

7.1.5 Ein hoch aufgelöster Teilflächendatensatz

Als Beispiel für den in dieser Arbeit neu erstellten Teilflächendatensatz zeigt die Abbildung 7-5 einen Ausschnitt des Südallermodells, das Bearbeitungsgebiet Rhume. Es schließt die Einzugsgebiete von Söse, Sieber und Oder mit ein. Die linke Seite der Abbildung zeigt das bearbeitete Gewässernetz über dem Höhenmodell SRTM25 des Projektpartners WAWI, die rechte Seite den verfeinerten Teilflächendatensatz. Beide Darstellungen sind mit der hydrografische Karte überlagert.

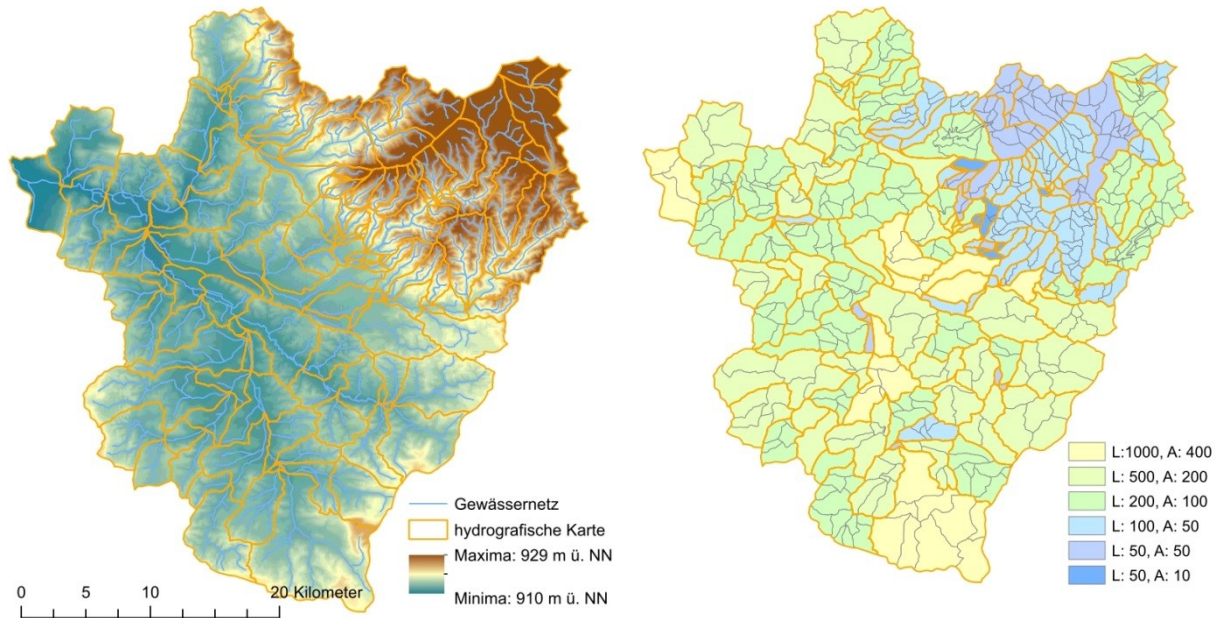


Abbildung 7-5: Höhenmodell SRTM25, überlagert mit hydrografischer Karte und überarbeitetem Gewässernetz (links) und Verfeinerung des Südallermodells (rechts) am Beispiel des Einzugsgebiets der Rhume.

Tabelle 7-2 zeigt die Verwendung der Teilflächendatensätze für das Einzugsgebiet der Rhume geordnet nach Häufigkeit, im rechten Teil der Abbildung 7-5 sind die Datensätze farblich unterschieden. Der am höchsten aufgelöste Teilflächen-Datensatz 6 (L: 50, A: 10) kam nur im Bereich der hohen Gefällegradienten am südwestlichen Harzrand zur Anwendung. Im Harz selber fanden die Datensätze 3 (L: 200, A: 100), 4 (L: 100, A: 50) und 5 (L: 50, A: 50) Verwendung.

Tabelle 7-2: Verwendung der mit TOPAZ generierten Teilflächendatensätze im Einzugsgebiet der Rhume.

Datensatz	Gewässerlänge [m]	Quellgebietsgröße [ha]	Anzahl
3: L: 200, A: 100	200	100	230
4: L: 100, A: 50	100	50	132
2: L: 500, A: 200	500	200	112
5: L: 50, A: 50	50	50	72
1: L: 1000, A: 400	1000	400	26
6: L: 50, A: 10	50	10	11
Summe			583

In den tieferen Lagen des Einzugsgebiets der Rhume kamen die Datensätze 1 (L: 1000, A: 400) bis 3 (L: 200, A: 100) zum Einsatz. Vereinzelt war auch hier der Rückgriff auf höher

aufgelöste Datensätze erforderlich. Zusammenfassend wurden die Datensätze 3 (L: 200, A: 100) und 4 (L: 100, A: 50) am häufigsten verwendet, während die sehr groben und sehr feinen Datensätze selten zum Einsatz kamen. Insgesamt stieg die Anzahl der Teilflächen im Einzugsgebiet der Rhume durch die Verfeinerung von 142 auf 583. Die mittlere Teilflächengröße sank von 8,4 km² auf 2,1 km². Die größte Teilfläche im verfeinerten Datensatz weist eine Fläche von 11,53 km² auf.

Tabelle 7-3 zeigt drei unterschiedliche Teilflächendatensätze. Sie vergleicht die hydrografische Karte mit dem für das Projekt KLBIW (Meon et al., 2012) erstellten Teilflächendatensatz sowie mit dem in dieser Arbeit erstellten Südallermodell. Das Erreichen einer höheren Auflösung gelang insbesondere in den Einzugsgebieten von Rhume und Innerste.

Tabelle 7-3: Teilflächen der Hydrografischen Karte, des KLBIW- und des Südallermodells.

		1	2	3		
	Größe [km ²]	Hydrografische Karte	KLBIW- Modell	Südaller- Modell	Differenz 3-2 [-]	Differenz 3-2 [%]
		Anzahl Teilflächen				
Obere Leine	628	45	118	148	30	25%
Rhume	1.189	142	291	583	292	100%
Leine Ilme	1.153	125	403	381	-22	-5%
Obere Oker	810	264	470	516	46	10%
Innerste	1.265	145	333	624	291	87%
Aller Nord	10.676	1.731	2.571	2.571	0	0%
Summe	15.722	2.452	4.186	4.823	637	15%

Die Erstellung eines Gesamtmodells erfolgte durch die Zusammenführung des Südallermodells mit dem nördlichen Teil des Einzugsgebiets der Aller (Aller Nord), dargestellt in der Abbildung 7-1 durch die nicht schraffierten Teileinzugsgebiete. Für diese Teilgebiete wurden im Wesentlichen die Teilflächen aus dem Projekt KLBIW unverändert übernommen. Für das Einzugsgebiet der unteren Oker konnten die Teilflächengrenzen an die hydrografische Karte angepasst werden. Eine Ergänzung des Gewässernetzes auf Grundlage der topografischen Karte 1:25.000 erfolgte für einen Großteil des Gebiets. Wo dieser Aufwand nicht zu leisten war, wurde das Gewässernetz des NLWKN unverändert übernommen.

Der Ermittlung des Teilflächengefälles in Fließrichtung diente innerhalb von Niedersachsen ein digitales Höhenmodell mit einer Auflösung von 5*5 m. In Randbereichen außerhalb Niedersachsens kam das DHM SRTM 25 zum Einsatz. Für die Hauptgewässer Aller, Leine und Oker außerhalb des Südallermodells sowie die Nebengewässer lieferte das KLBIW-Modell die Gefälle.

Die Abbildung 7-6 zeigt abschließend Teilflächen (weiß umrandet) im Bereich der Nordgruppe der Harztalsperren auf einer Aggregation des Amtlichen Topografisch-Kartografischen Informationssystems (AKTIS) (adv-online.de): Aus der Oker- und Innerstetalsperre sowie aus den Flüssen Radau und Gose wird Wasser in die Granetalsperre übergeleitet, die mit dem zentralen Trinkwasserwerk ausgerüstet ist.

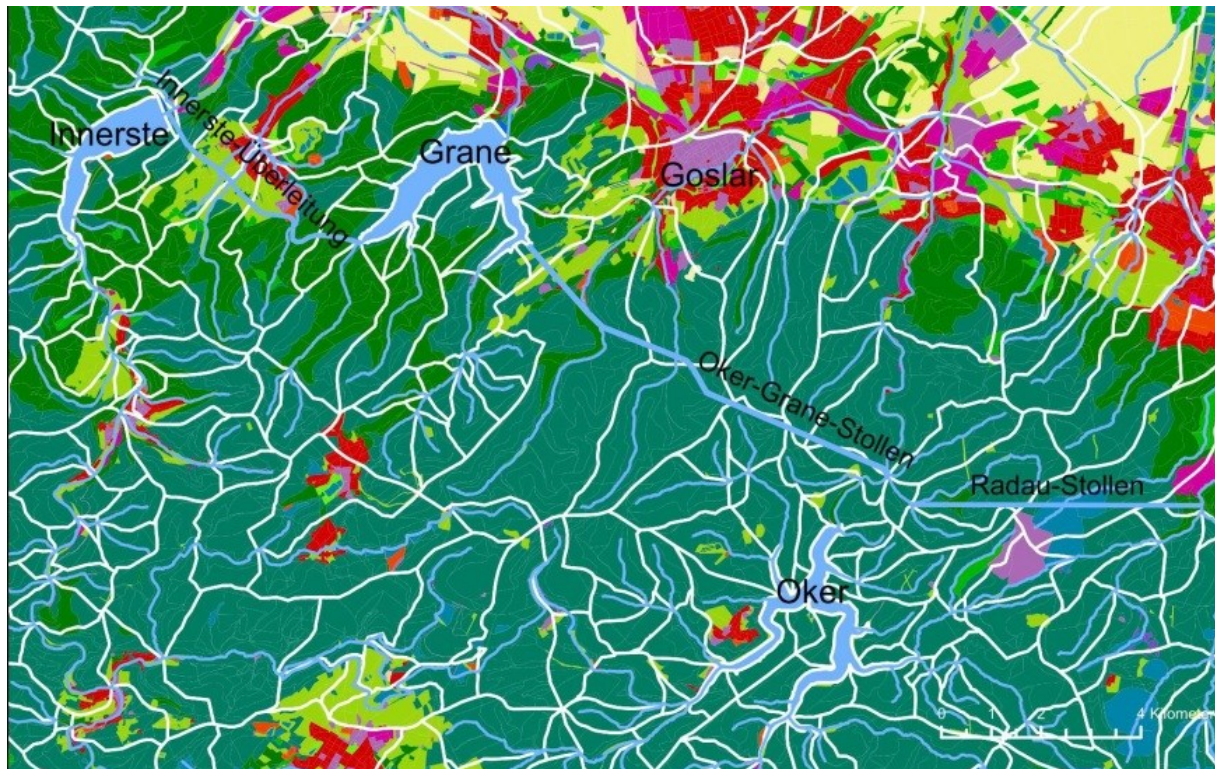


Abbildung 7-6: Teilflächen (weiße Umrandung) im Bereich der Nordgruppe der Harztalsperren auf dem aggregierten digitalen Landnutzungsmodell ATKIS.

7.1.6 Erstellung von Hydrotopen

Hydrotopen als hydrologisch gleich reagierende Flächen sind die kleinsten Berechnungseinheiten im Modellsystem PANTA RHEI. Sie entstehen aus einer Zusammenführung von Landnutzung und Bodeneigenschaften innerhalb einer Teilfläche. Die Eingangsdaten für ihre Erstellung waren das digitale Landschaftsmodell ATKIS und die Bodenübersichtskarte 1:50 000 (Boess et al., 2004), in Randbereichen auch die Bodenkarte 1:1 000 (Hartwich et al., 1998). Da nicht alle Objektarten des ATKIS hydrologisch unterschiedlich reagieren, konnte durch ihre Zusammenfassung in 9 Landnutzungen die Anzahl der Hydrotopen begrenzt werden (Tabelle 7-4).

Tabelle 7-4: Aggregierte Landnutzungen für die Erstellung von Hydrotopen.

1 Acker	6 Siedlungsfläche
2 Moor	7 Gewässer
3 Laubwald	8 Grünland
4 Nadelwald	9 vegetationslose Fläche
5 Mischwald	

Die oberste Bodenschicht der 320 Bodenarten der Bodenübersichtskarte diente der Aggregation zu 5 Bodenarten. Gemäß ihrer typischen Verteilung auf die Hauptbodenarten Sand, Schluff und Ton erfolgte die Zuweisung zu vier Bodengruppen, die in Tabelle 7-5 gezeigt sind. Auf eine detaillierte Diskussion der Bodenarten wird hier verzichtet. Trotz dieser groben Zusammenfassung ergaben sich aus der Verschneidung von Landnutzung und Bodengruppe je Teilfläche für das Gesamtmodell über 61 600 Hydrotopen, für das Südallemmodell immer

noch über 23 000. Dieses Vorgehen ist ein Beispiel für die Reduzierung der in Abschnitt 4.1 diskutierten räumlichen Variabilität, um die Rechenzeit des Modells zu begrenzen.

Tabelle 7-5: Aggregierte Bodenarten nach Anteilen der Hauptbodenarten für die Erstellung von Hydrotopen.

Bodenart oberste Schicht	Hauptbodenart			Bodengruppe
	Sand [%]	Schluff [%]	Ton [%]	
S	90	5	5	1
Us, SI	25	70	5	2
Ut	20	65	15	2,5
Tu	10	50	40	3

7.1.7 Entwässerungsreihenfolge und Bauwerke

Die Erstellung der Entwässerungsreihenfolge (Fließt-in-Liste) schließt den Modellaufbau ab. In diesem Schritt wird festgelegt, in welcher Reihenfolge Teilflächen und andere Systemelemente ineinander entwässern. Zum Teil entstand die Entwässerungsreihenfolge als Nebenprodukt der Teilflächenverfeinerung. Bauwerke wie Pegel, Talsperren und Überleitungen müssen jedoch im Modellsystem PANTA RHEI nachträglich eingebaut werden.

Die in Abbildung 7-7 gezeigte Baumdarstellung der Entwässerungsreihenfolge gibt das Westharzmodell wieder. Sie ist nicht genordnet. Automatisch von PANTA RHEI generiert, stellt sie eine wichtige Hilfestellung bei Aufbau und Kalibrierung dar. Alle Pegel sind in der Darstellung als rote Systemelemente erkennbar, die drei untersten werden im Gebietsauslass zusammengeführt. Dies sind die Pegel Hohenrode (Innerste), Schladen (Oker) und Northeim (Rhume), an denen das Westharzmodell endet (siehe Abbildung 7-1). Der Gebietsauslass nimmt weiterhin die Trinkwasserfernleitungen „Söse Nord“ und „Grane Ost“ auf, die im Südallemmodell nach Hildesheim sowie nach Goslar, Braunschweig und Wolfsburg führen. Fernleitungen, Gräben und Wasserwerksentnahmen können in PANTA RHEI mit Hilfe von Verzweigungen (gelb) modelliert werden. Die die Talsperren umgebenden und direkt in sie entwässernden Teilflächen werden in der Baumdarstellung fächerförmig angeordnet. Die Steuerung der Talsperren ist als violett gefärbtes Systemelement unterhalb von ihnen Talsperren angeordnet. Der Oberlauf der Sieber ist durch die Gräben des Oberharzer Wasserregals geprägt, im Oberlauf der Innerste sind als türkisfarbene Systemelemente 14 Rückhaltebecken zu erkennen. Sie fassen die rund 60 dort befindlichen Teiche zusammen.

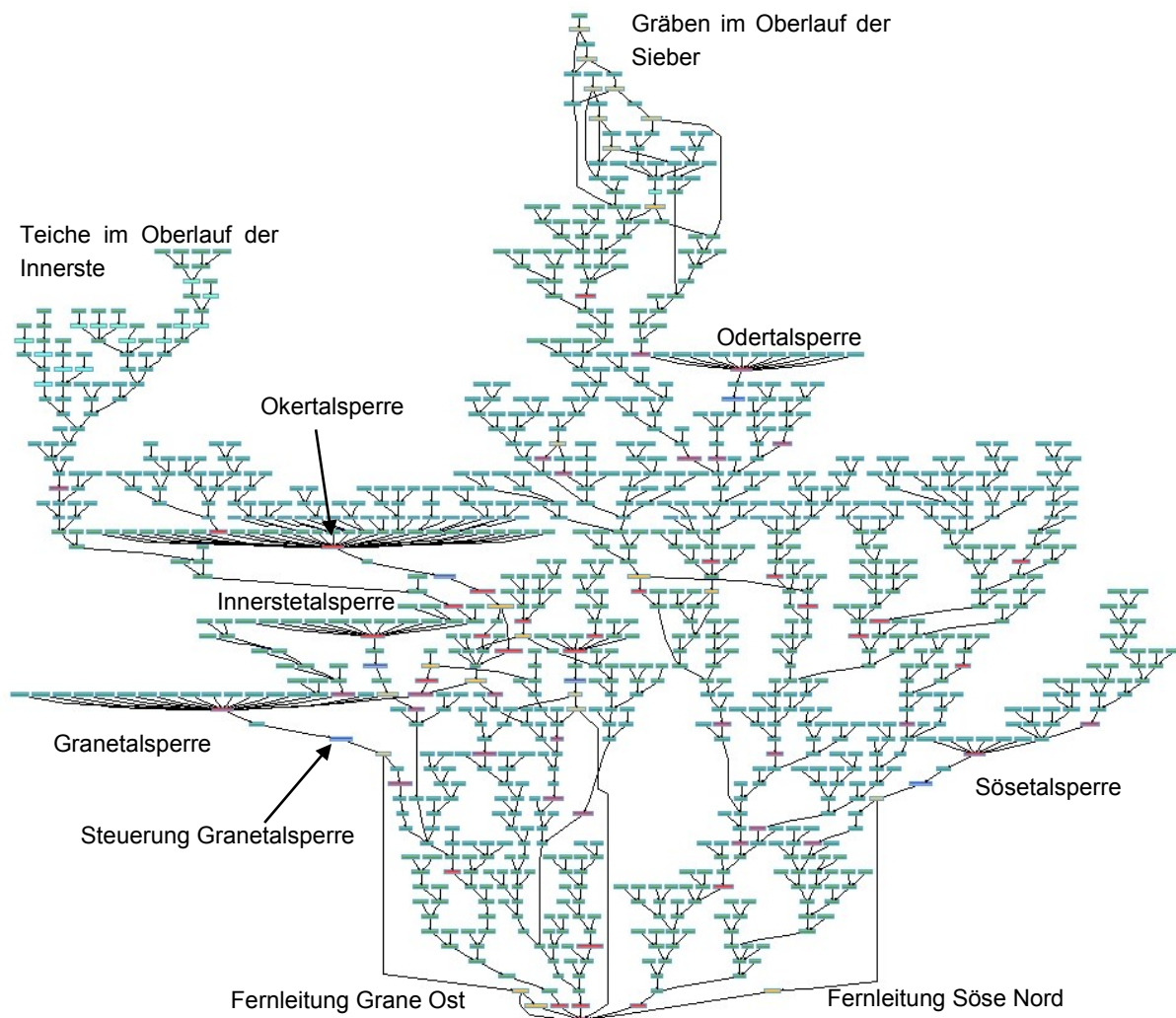


Abbildung 7-7: Modellstruktur des Westharzmodells als Baumdarstellung der Systemelemente.

7.1.7.1 Verzweigungen

Verzweigungen bilden eine Klasse von Systemelementen in PANTA RHEI, die sich vielseitig nutzen lassen. Sie fanden bei der Modellierung von Fernleitungen, Gräben und Wasserwerksementnahmen Verwendung. Abbildung 7-8 zeigt die Verzweigung in den Oker-Grane-Stollen, für die Nordgruppe ein Element von zentraler Bedeutung. Abhängig vom Zufluss wird die Aufteilung hier in zwei Arme vorgenommen werden, auch mehrere Arme sind möglich. Weder die Wiedergabe der Abflusscharakteristik des Pegels Okertal noch des Füllungsgrades der Granetalsperre ist ohne eine sorgfältige Definition der Abflussaufteilung in Abhängigkeit vom Zufluss möglich. Ein wesentlicher Teil des Kalibrierungsaufwandes entstand durch die Berücksichtigung dieser Abhängigkeiten.

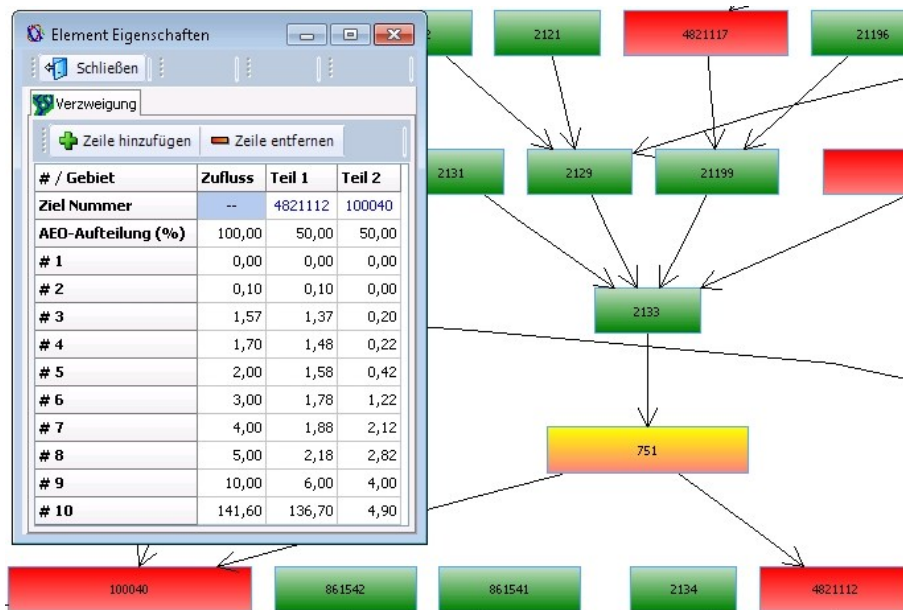


Abbildung 7-8: Die Verzweigung des Oker-Grane-Stollens, Systemelement Nr. 751 und ihre Eigenschaften: die vom Zufluss abhängige Aufteilung des Abflusses zum Pegel Okertal (4821112) und zum Oker-Grane-Stollen (100040).

7.1.7.2 Teiche im Einzugsgebiet der Innerste

Da die 53 Teiche im oberen Einzugsgebiet der Innerste Hochwasserscheitel deutlich dämpfen (Teicke, 2011), war eine Abbildung derselben im Modell notwendig. Hierfür wurde auf die auch von Krol et al. (2011) verwendete Zusammenfassung mehrerer kleiner Speicher zu einem größeren Speicher zurückgegriffen. Die Teiche sind in teilweise verzweigten Kaskaden angeordnet, die Volumen der Teiche sind bekannt, nicht jedoch ihre Speicherinhaltslinien. Ausgehend von der Geometrie des untersten Absperrbauwerks einer Kaskade und des Talgefälles wurde das Volumen des zusammenfassenden Speichers so gewählt, dass es dem Gesamtvolumen der Kaskade entsprach. Die Abgabe wurde in Abhängigkeit des Wasserstands, aus der Regelabgabe und der Leistungsfähigkeit der Hochwasserentlastung abgeleitet. Damit konnten die für eine Modellierung mit dem Verfahren nach Puls (Maniak, 2005) erforderlichen Kennlinien entwickelt werden. Abbildung 7-9 zeigt diese Kennlinien für den Speicher Grumbach_A01, der die Teichkaskade des Grumbachs zusammenfasst.

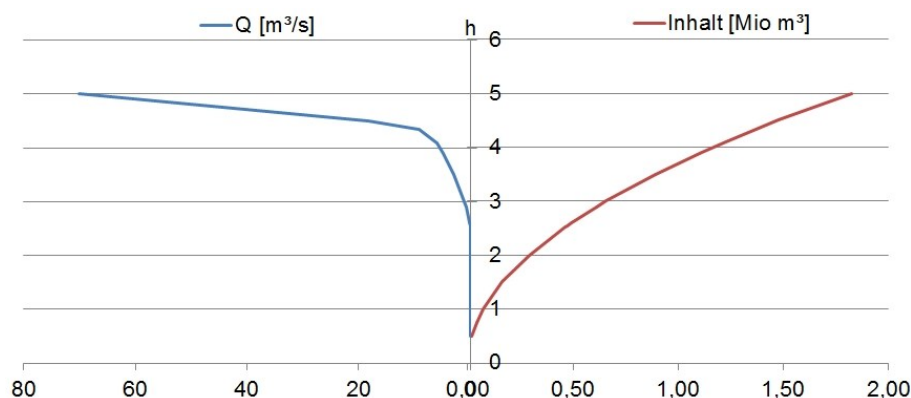


Abbildung 7-9: Kennlinien für den Speicher Grumbach_A01, der die Teichkaskade des Grumbachs zusammenfasst.

Er liegt im oberen Teil der Abbildung 7-10, die 53 Teiche im Oberlauf der Innerste auf dem Teilflächendatensatz des Wasserhaushaltsmodells darstellt. Dreiecke markieren die 14 zusammengefassten Speicher.



Abbildung 7-10: Teichkaskaden des Oberharzer Wasserregals im Oberlauf der Innerste und ihre Zusammenfassung zu größeren Speichern, in der Abbildung als Dreiecke dargestellt.

7.1.7.3 Talsperren

Das Systemelement ‚Talsperre‘ ist für die integrierte Modellierung des Talsperrenbetriebs vorgesehen. Es enthält neben der Speicherinhaltslinie (Inhalt (Mio m³) in Abhängigkeit vom Wasserstand (m ü. NN)) den Betriebsplan, der in diesem Projekt nach Monaten gegliedert ist, grundsätzlich aber auch zeitlich höher aufgelöst sein kann. In sogenannten Lamellen sind für jeden Monat verschiedenen Speicherinhalten entsprechende Abgaben zugeordnet (siehe Abbildung 2-6).

Abhängig von Speicherinhalt und Monat berechnet das Systemelement die Abgabe auf Grundlage der Speichergleichung:

$$S_{t+1} = S_t + Q_{zu,t} - Q_{ab,t} - Et_t \quad 12$$

Die Angabe eines Regelintervalls und eine Begrenzung der möglichen Abgabezunahme je Zeitschritt verhindern, dass die berechnete Abgabe um einen Wert oszilliert, sich also sprunghaft ändert, weil in einem Zeitschritt eine Lamellengrenze überschritten und durch die erhöhte Abgabe im nächsten Zeitschritt wieder unterschritten wird. Das Systemelement Talsperre ermöglicht auch den Vergleich des berechneten mit dem beobachteten Speicherinhalt. Der Beobachtungswert liegt als Stauhöhenpegel vor. Neben der eigentlichen Talsperrensteuerung sind weitere Systemelemente notwendig, um die Talsperre abzubilden. Dies zeigt die Abbildung 7-11 am Beispiel der Sösetalsperre.

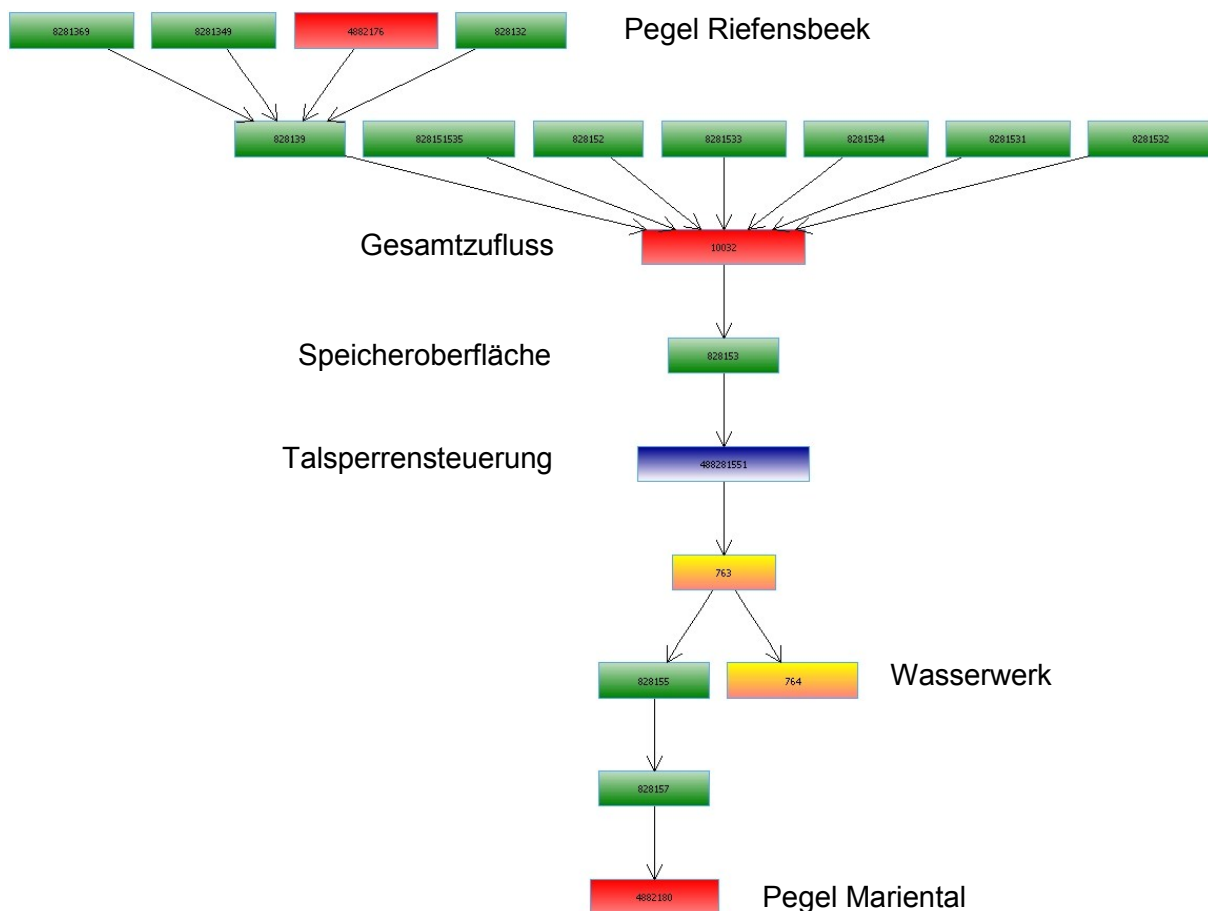


Abbildung 7-11: Systemelemente einer Talsperre am Beispiel der Sösetalsperre.

Unter dem Zuflusspegel Riefensbeek sind die Teilflächen angeordnet, die die Talsperre umgeben und direkt in sie entwässern. Ein Pegel ‚Gesamtzufluss‘ wurde eingebaut, um alle Talsperrenzuflüsse zusammenzufassen. Der Gesamtzufluss liegt als Beobachtungswert nicht vor, ist aber für die Optimierung des Talsperrenbetriebs wichtig. Ein Systemelement der Art ‚Teilfläche‘ berücksichtigt die Oberfläche der Talsperre für die Berechnung der Verdunstung. Unter dem bereits behandelten Systemelement ‚Talsperre‘ wird in einer Verzweigung die Wasserwerksentnahme berücksichtigt. Der Pegel Mariental unterhalb der Talsperre ist für eine Kontrolle bei der Kalibrierung unerlässlich. Nur wenn sowohl Talsperrenabgabe als auch Wasserwerksentnahme richtig berechnet werden, weist dieser Pegel hohe Gütemaße auf.

7.1.8 Diskussion

In den Modellaufbau wurde erheblicher Aufwand investiert, um sowohl für die Fragestellung als auch für eine Nachnutzung gute Voraussetzungen zu schaffen. Diese sind die genaue Übereinstimmung des Modells mit der hydrografischen Karte Niedersachsen, die hohe räumliche Auflösung, die detaillierte Abbildung des Talsperrenverbundsystems, sowie Teilmodelle unterschiedlicher Ausdehnung.

Das Westharzmodell wurde als Ausschnitt des Südallermodells gewählt, um einerseits den Kalibrierungsaufwand und andererseits die Rechenzeiten für die Langzeitkontinuumsimulation zu verringern. Die Ergebnisse des Westharzmodells können in das Südallermodell und schließlich auch in das Gesamtmodell übertragen werden. Damit kann auch eine Simulation des Verbundbetriebs in großem Maßstab, also unter Berücksichtigung der von der Harzwasserwerke GmbH betriebenen Grundwasserwerke, mit den in dieser Arbeit erstellten Werkzeugen erfolgen.

7.2 Kalibrierung

Sowohl konzeptionelle als auch physikalisch basierte Modelle beschreiben den Wasserhaushalt mittels vereinfachender Annahmen in den der Modellierung zu Grunde liegenden Gleichungen. Fehler in den Eingangsdaten oder die Vernachlässigung der natürlichen Variabilität der Einzugsgebiete führen zu systematischen Fehlern (Bias), die durch Kalibrierung verringert werden können. Wie in Abschnitt 4.3 beschrieben, wurden für einfache Modelle mit wenigen Parametern automatisierte Kalibrierungsverfahren entwickelt und erfolgreich angewendet (Merz et al., 2009). Nimmt die Anzahl der Kalibrierparameter zu, ist eine automatische Kalibrierung wegen der Interdependenz der Modellparameter nicht möglich. Gegenseitige Abhängigkeiten von Parametern kommen bei hydrologischen Prozessbeschreibungen häufig vor. Es ist daher unmöglich, ein einziges optimales Parameterset zu bestimmen (Beven, 1989). Eine Methode, die Unsicherheit von Modellparametern und darauf basierenden Simulationsergebnissen zu bestimmen, ist die Bayes'sche Interferenz (Merz et al., 2011b, S. 110). Sie ermöglicht, die von einer Verteilung von Parametersätzen ausgehende Unsicherheit zu quantifizieren und von anderen Unsicherheitsquellen zu separieren.

Derart aufwändige Methoden gehören eher der Grundlagenforschung an und konnten in dieser Arbeit nicht angewendet werden. Der hier verfolgte Weg war eine Optimierung durch strukturiertes Ausprobieren, bis ein subjektiv akzeptables und auf einem physikalisch plausiblen Parameterset beruhendes Ergebnis erreicht war. Neben den in Abschnitt 4.2 eingeführten Gütemaßen spielten je nach Fragestellung auch eher qualitative Aspekte eine Rolle, beispielsweise die Übereinstimmung der langfristigen monatlichen Wasserbilanz, die Hochwasserscheitel einer kurzen Zeitreihe oder die Abflussspitze im März zur Beurteilung einer guten Wiedergabe der Schneeschmelze. Nicht selten wurden einer besseren Wiedergabe dieser qualitativen Güteaspekte einige Prozente an Modelleffizienz geopfert.

7.2.1 Kalibrierung mit Tageswerten für die Zeitreihe 1971-2000

Für die Beurteilung des Klimawandel-Einflusses auf den Betrieb der Talsperren muss ein konstanter Betrieb für einen 30-jährigen Zeitraum auf Tagesbasis modelliert werden. Dies ist notwendiger Weise eine Abstraktion, da es einen so langfristigen konstanten Betrieb in der Realität nicht gibt. Talsperrenverbundsysteme unterliegen einem ständigen Veränderungsprozess, in dessen Verlauf sie an sich ändernde Rahmenbedingungen angepasst werden: Wartungsarbeiten und große Instandsetzungsmaßnahmen beeinträchtigen den Betrieb, nachfrageseitige Schwankungen führen zu Änderungen in den Produktionsmengen. Diese zeitlich auf wenige Jahre begrenzten Änderungen kann das Modell nicht abbilden. Wenn das Modell die langfristige Systemcharakteristik gut repräsentiert, wird es der Aufgabenstellung gerecht.

7.2.1.1 Eingangsdaten

Die Kalibrierung erfolgte auf der Grundlage von gerasterten meteorologischen Datenfeldern, die von Haberlandt et al. (2010) im Rahmen des KLIFWA- und KLIBIW-Projektes bereitgestellt wurden. Unter Nutzung von 771 Niederschlagsstationen und 123 Stationen für die anderen Klimavariablen Temperatur (Min/Max/Mittel), Globalstrahlung, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit wurden durch den Partner flächendeckende Tageswertraster der Klimavariablen mit einer Zellengröße von 1 km² für Niedersachsen und den Zeitraum 1951-2009 interpoliert. Dabei kam für Temperatur und Luftfeuchte „external drift kriging“ zum Einsatz, wobei ein digitales Höhenmodell von Niedersachsen als Zusatzinformation diente. Für die anderen Klimavariablen lieferte „ordinary kriging“ die besseren Ergebnisse. Die Abbildung 7-12 zeigt oben das Niederschlagsraster dieses Datensatzes für den Ausschnitt des Westharzes sowie aus dem Raster abgeleitete Isohyeten, um einen Vergleich mit den Beobachtungswerten des Talsperrenbetreibers zu ermöglichen.

Wo die Beobachtungen der Harzwasserwerke (Abbildung 2-2 auf Seite 17) für einen etwas längeren Zeitraum zwei Gebiete sehr hohen Niederschlags über Brocken und Bruchberg zeigen, weist die Interpolation ein größeres Niederschlagsgebiet mit 1 600 mm Jahresniederschlag aus. Dieses stimmt ziemlich gut mit dem Niederschlagsgebiet von 1 500 mm aus der Beobachtung durch die Harzwasserwerke überein. Damit wird eine Unterschätzung der Extremwerte durch eine Überschätzung der Ausdehnung ausgeglichen.

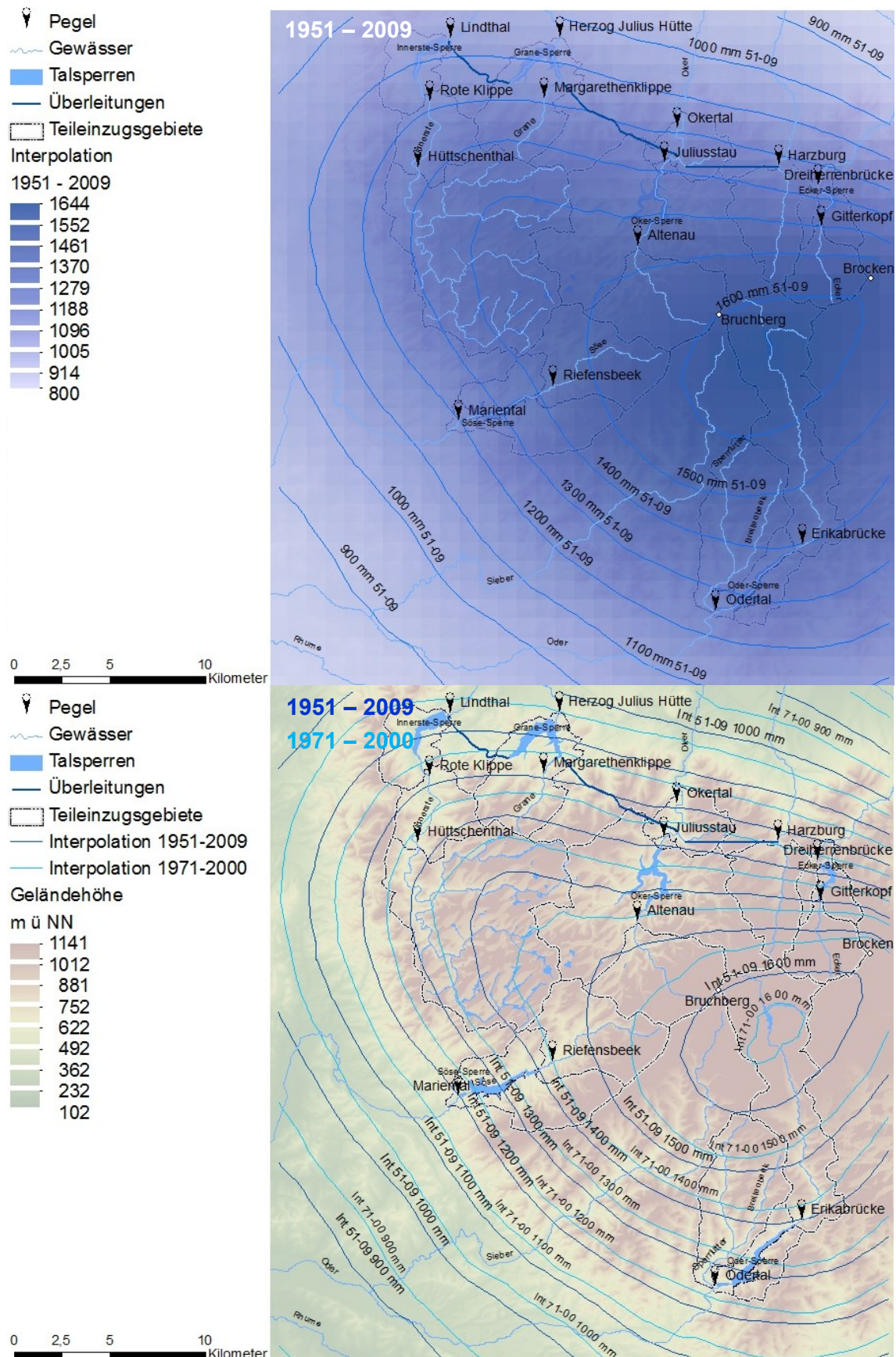


Abbildung 7-12: Oben: Langjährige Mittelwerte des Niederschlags für den Zeitraum 1951-2009, erstellt mit den Rasterdaten aus Haberlandt et al. (2010). Unten: Vergleich der Isohyeten des Zeitraums 1951-2009 und des für die Kalibrierung verwendeten Zeitraums 1971–2000.

Angesichts der Tatsache, dass das Niederschlagsraster nicht für den Harz optimiert, sondern für ganz Niedersachsen erstellt wurde, ist das ein sehr gutes Ergebnis.

Im unteren Teil der Abbildung 7-12 werden langjährigen Mittelwerte aus zwei Zeiträumen der Interpolation von Haberlandt et al. (2010) verglichen, den Zeiträumen 1951-2009 und 1971-2000. Letzterer fand für die Kalibrierung des Westharzmodells Verwendung. Die Isohyeten des kürzeren Zeitraums sind deutlich nach innen verschoben, zwischen 1971 und 2000 waren die Niederschläge im Harz geringer als im gesamten Zeitraum 1951-2009 Zeitreihe.

7.2.1.2 Kalibrierung der Talsperrenzuflüsse

Die Zuflüsse zu den sechs Talsperren im Westharz wurden für die Zeitreihe 1971-2000 auf Tagesbasis kalibriert. Besonderes Augenmerk lag dabei auf den langjährigen Mittelwerten der monatlichen Abflüsse, die in Abbildung 7-13 gezeigt sind.

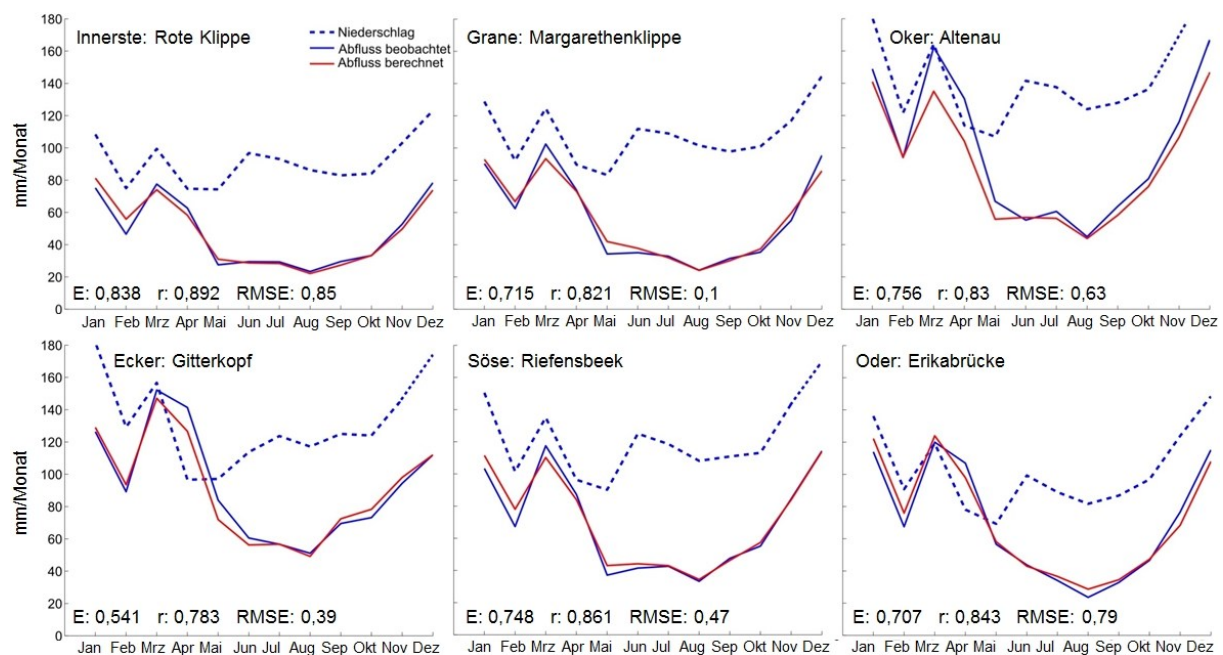


Abbildung 7-13: Langjährige Monatswerte des Abflusses an den Zulaufpegeln der Talsperren (Gocht und Meon, 2012, verändert).

Mit einer Ausnahme wurde für alle Pegel eine sehr gute Modelleffizienz von 0,7 bis über 0,8 auf Stundenbasis berechnet. Nur der Zufluss der vom Brocken gespeisten Eckertalsperre weist eine geringere Effizienz von 0,54 auf. Die Kalibrierung des Schneemodells nach Anderson (1973) nahm viel Zeit in Anspruch, da die Kalibrierung der fünf Modellparameter dieses physikalisch basierten Ansatzes sich als sehr aufwändig herausstellte. Für fünf von sechs Talsperrenzuflüssen wurde das durch die Schneeschmelze verursachte Abflussmaximum im März sehr gut getroffen. Nur für die Oker blieb das Ergebnis hinter den anderen Zuflüssen zurück. Insgesamt wurden die langjährigen Monatsmittel sehr gut getroffen.

7.2.1.3 Kalibrierung der Talsperreninhalte

Die Zeitreihe der Talsperreninhalte wird vom Gesamtzufluss zu den Talsperren, den Abgaben und bei der Granetalsperre auch den Überleitungen bestimmt. Nur wenn alle diese Größen gut getroffen sind, kann die Zeitreihe eine gute Modelleffizienz aufweisen. Die Abbildung 7-14 zeigt eine Übersicht für den Kalibrierungszeitraum.

Da für die lange Zeitreihe nur Talsperreninhalte am Monatsersten aus Eggelsmann und Lange (2011) vorlagen, wurden diese aus der berechneten Zeitreihe für den Vergleich extrahiert.

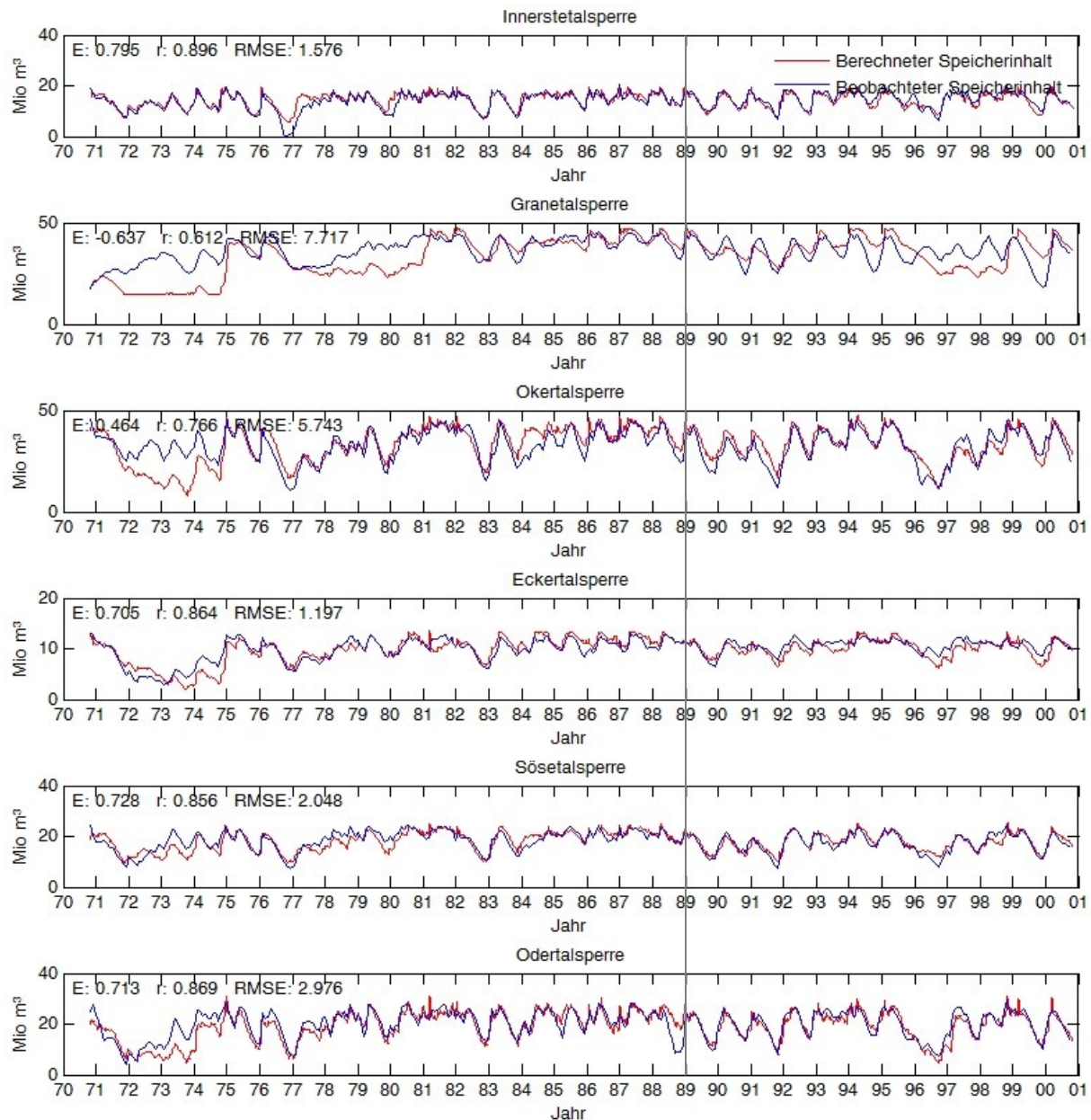


Abbildung 7-14: Talsperreninhalte am Monatsersten im Vergleich mit der Beobachtung für die Zeitreihe 1971-2000. Die heute verwendeten Betriebsregeln wurden 1989 zuletzt überarbeitet (graue Linie in der Abbildung).

Die der Kalibrierung zu Grunde liegenden Betriebsregeln gelten erst seit 1989, wurden aber damals nur im Hochwasserbereich verändert, worauf die allgemein gute Übereinstimmung auch für den Zeitraum vor 1989 hindeutet. Die Innerstetalsperre zeigt die besten Werte mit einer Effizienz bei 0,8 und einer Korrelation bei 0,9. Dies sind kaum zu übertreffende Werte. Mit Bezug auf Merz et al. (2009) kann man den wesentlichen Grund darin sehen, dass die Innerstetalsperre mit 85 km² am Zuflusspegel Rote Klippe das bei weitem größte Einzugsgebiet unter den Talsperren des Westharzes aufweist. Zudem ist sie unbeeinflusst von Wasserwerksementnahmen, die Überleitung in die Granetalsperre ist quantitativ von untergeordneter Bedeutung.

Deutlich dahinter zurück bleibt die Granetalsperre mit einer negativen Effizienz. Dafür sind zwei Gründe ausschlaggebend: Das Wasserwerk der Granetalsperre wurde, wie später gezeigt wird, allmählich in Betrieb genommen. Das Modell geht jedoch von Anfang an von einem Volllastbetrieb aus, was die Annahme eines konstanten Betriebs über 30 Jahre erfordert. Der zweite Grund liegt in den im folgenden Abschnitt 7.2.1.4 diskutierten Überleitungen durch den Oker-Grane-Stollen.

Für die Bewertung der weiteren Talsperren sind die Inhalte in den frühen Siebzigerjahren weniger gut, ab 1977 hingegen gut getroffen. Dies zeigt sich in der Modelleffizienz, die für die Okertalsperre bei 0,5, bei den übrigen Talsperren über 0,7 liegt.

Dauerlinien als nach Größe geordnete Inhalte einer Talsperre sind besonders geeignet, um die Wiedergabe der langfristigen Charakteristik des Talsperrenbetriebs zu beurteilen, da wartungs- oder betriebsbedingte Eingriffe weniger auf das Ergebnis durchschlagen. Wie die Abbildung 7-15 zeigt, weisen alle Talsperren außer der Granetalsperre exzellente Gütemaße bis hin zu 0,99 an der Eckertalsperre auf. Für das weniger gute Abschneiden der Granetalsperre gelten die zuvor genannten Gründe. Die langfristige Systemcharakteristik wird durch das Modell, mit Beobachtungsdaten angetrieben, sehr gut repräsentiert.

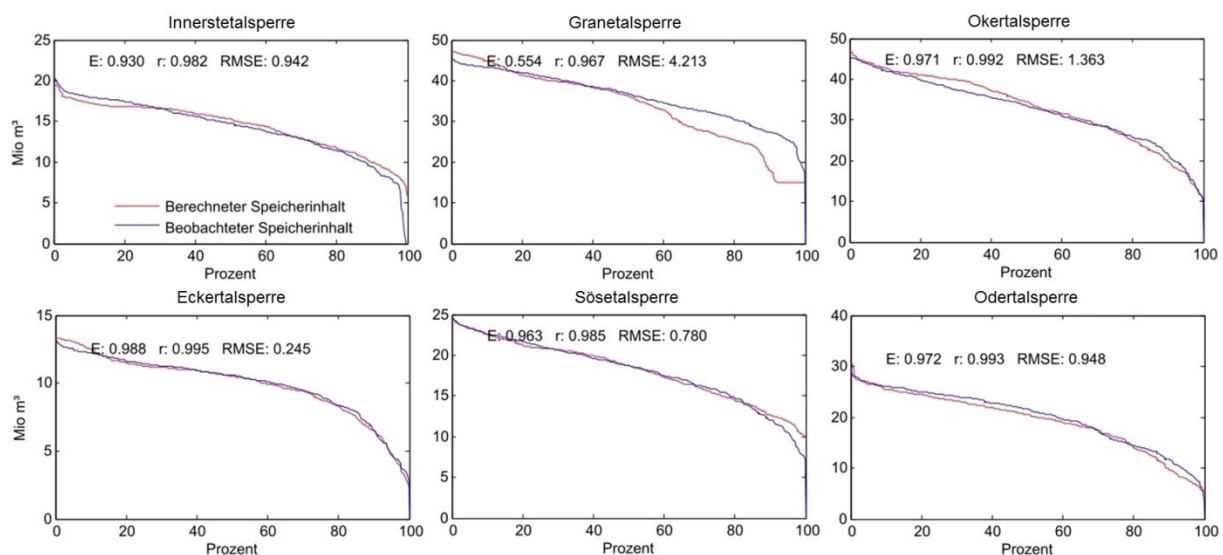


Abbildung 7-15: Dauerlinien der Talsperreninhalte am Monatsersten.

7.2.1.4 Kalibrierung der Überleitungen

Die Granetalsperre dient dem größten Wasserwerk des Talsperrenbetreibers als zentraler Speicher. Die wesentlichen Zuflüsse erhält sie nicht aus ihrem eigenen Einzugsgebiet, sondern durch die in Abbildung 2-4 auf Seite 26 gezeigten Überleitungen. Eine sorgfältige Kalibrierung der Überleitungen ist für eine gute Wiedergabe des Talsperrenbetriebs unerlässlich. Die Abbildung 7-16 vergleicht beobachtete und berechnete Jahressummen. Die Gütemaße zeigen den Mittelwert der gesamten Jahresreihe und die Abweichung der Berechnung von der Beobachtung. Die Überleitungen sind nur als Jahressummen in Eggelsmann und Lange (2011) veröffentlicht. Im langjährigen Mittel sind die Überleitungen auf -2 bis +4% genau getroffen. In einzelnen Jahren wie 1982, 1983 oder 1995 werden die Überleitungsmengen im

Oker-Grane-Tunnel deutlich überschätzt. Ihre Berechnung erfolgt, wie in Abbildung 7-8 gezeigt, auf der Grundlage einer zeitinvarianten, vom Zufluss abhängigen Aufteilung.

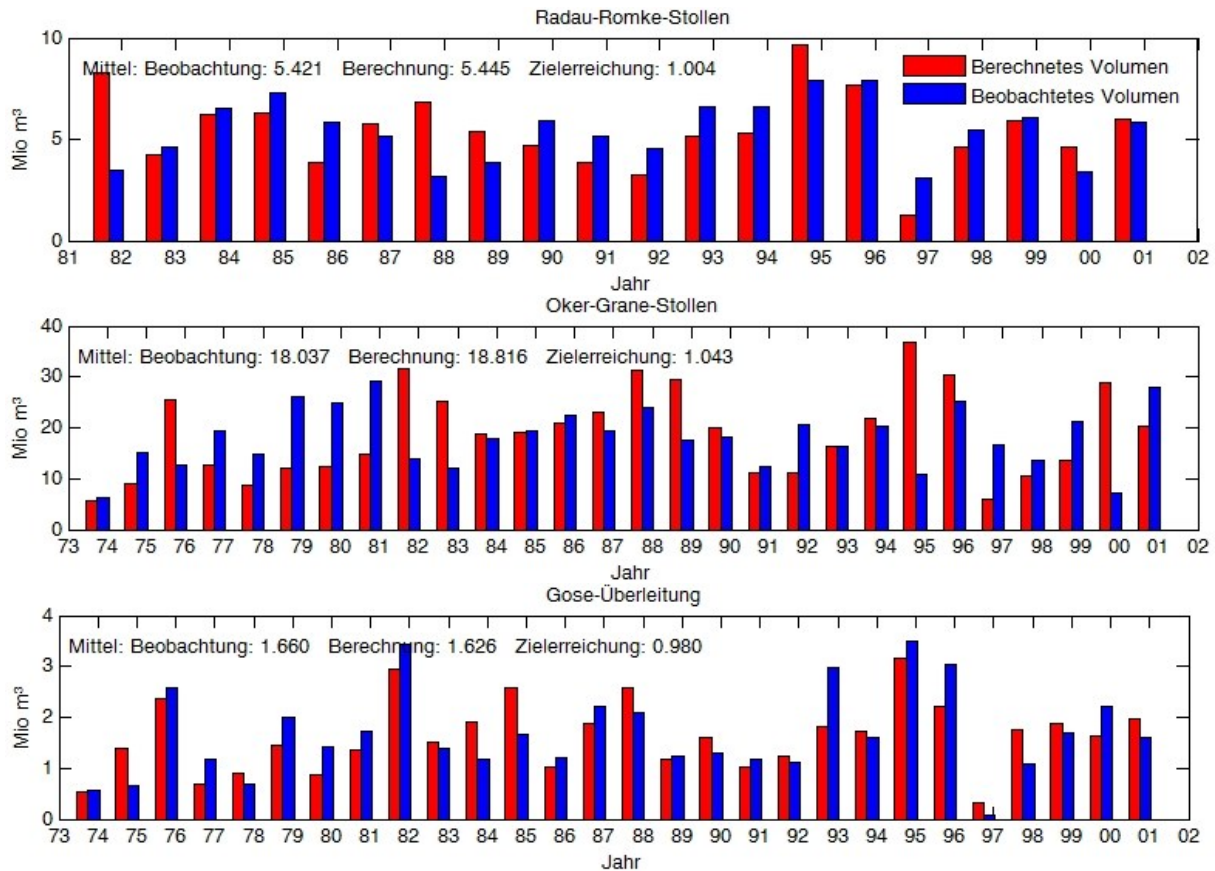


Abbildung 7-16: Beobachtete und berechnete Jahressummen der Überleitungen Radau-Stollen, Oker-Grane-Stollen und Gose-Beileitung.

In der Realität wird der Zulauf zum Oker-Grane-Stollen durch eine auf der Sohle der Oker befindliche Klappe geregelt, die bei zusätzlichem Bedarf angehoben wird, um den Zulauf zu erhöhen, oder abgesenkt wird, um ihn zu verringern. Dies ist zum Ausgleich des Speicherinhaltes der Granetalsperre in nassen und trockenen Jahren erforderlich. Es konnte gezeigt werden, dass eine Ankalibrierung an die tatsächlichen Überleitungen die Zeitreihe der Talsperreninhalte für die Grane wesentlich verbessert. Da dadurch aber die Annahme des konstanten Betriebs verletzt wird, wird dies hier nicht ausgeführt.

Zu beachten ist weiterhin, dass Oker-Grane-Stollen und Gose-Beileitung seit 1973 existieren und der Radau-Stollen erst 1981 hinzukam. Dies ist eine weitere Erklärung für die schlechte Wiedergabe des Speicherinhalts der Granetalsperre in den frühen Siebzigerjahren. Die Abbildung 7-17 zeigt die Überleitungen als Dauerlinien. Hier wird deutlich, dass die Abbildung der Überleitung als zeitinvariante Aufteilung für den Radau-Stollen und die Gose-Ableitung sehr gut funktioniert, wohingegen für den Oker-Grane-Stollen die trockenen Jahre unterschätzt und die nassen Jahre überschätzt werden.

Die Wiedergabe der Innerste-Überleitung ist nicht zufriedenstellend. Da zusätzliche Energie aufgewendet werden muss, um Wasser aus der Innerste-Talsperre über eine Höhendifferenz von 90 m in die Grane-Talsperre zu pumpen, wird diese Leitung nur in Betrieb genommen, wenn die Überleitungsmengen aus dem Oker-Grane-Stollen nicht ausreichen. Diese Bedin-

gungen können derzeit in PANTA RHEI nicht abgebildet werden. Für die hier vorgestellte Langzeitkontinuumsimulation ist dies jedoch hinnehmbar, da die Überleitungsmengen aus der Innerste-Talsperre nicht groß sind.

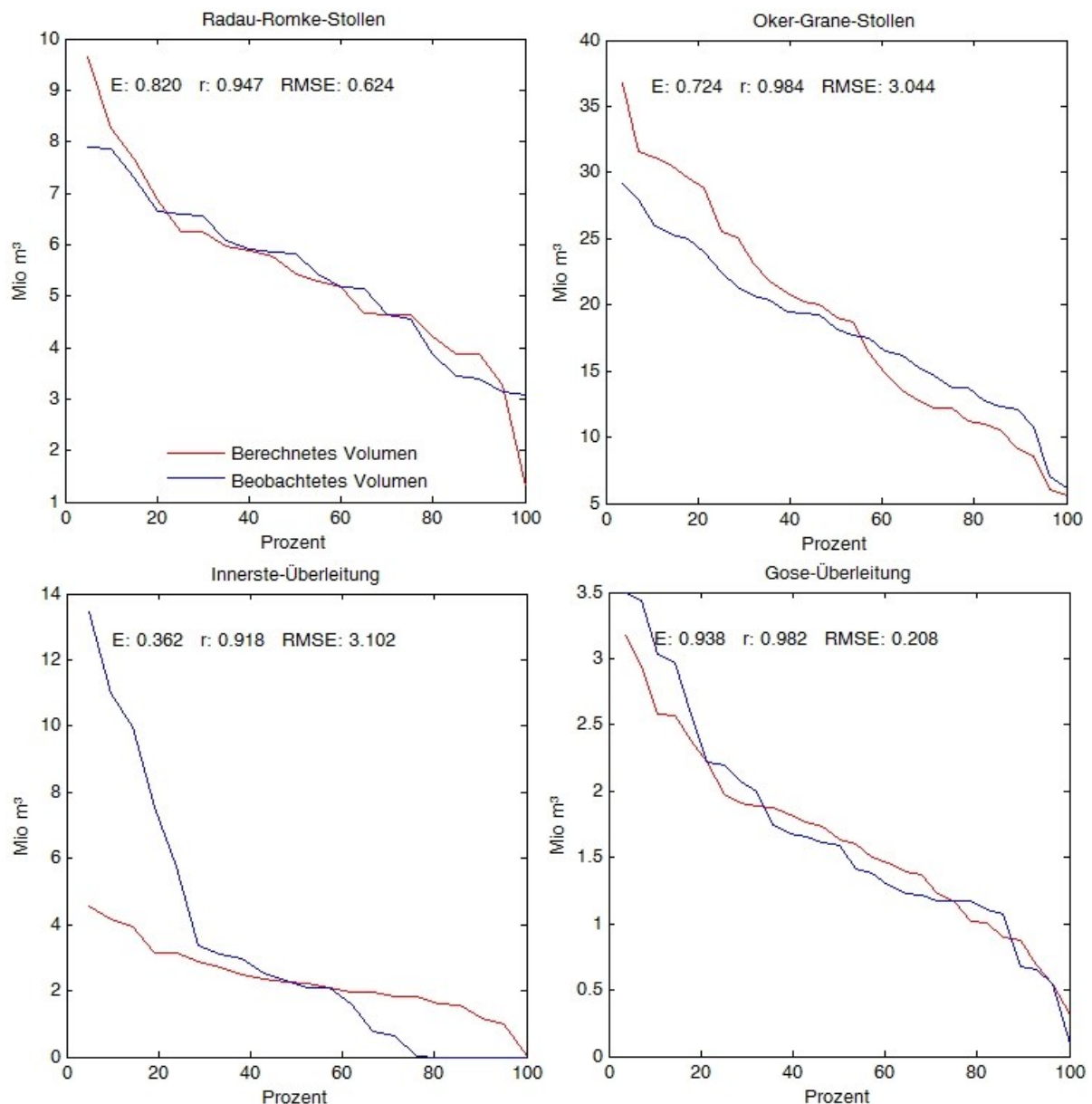


Abbildung 7-17: Dauerlinien der jährlichen Überleitungen im Verbund der Nordgruppe.

7.2.1.5 Kalibrierung der Wasserwerksentnahmen

Die Trinkwasserbereitstellung ist die vorrangige Nutzung des Talsperrenverbundes. Zu diesem Zweck existiert seit 1935 ein Trinkwasserwerk an der Sösetalsperre, seit 1941 eines an der Eckertalsperre und schließlich seit 1972 ein weiteres an der Granetalsperre. Die Abbildung 7-18 vergleicht beobachtete und berechnete Trinkwasserproduktion für die Zeitreihe 1971-2000.

Die Produktion ist in Monatswerten in Eggelsmann und Lange (2011) veröffentlicht. Die Gütemaße vergleichen wieder das langjährige beobachtete und berechnete Mittel. Hier beträgt die Abweichung vom langjährigen Mittelwert der Beobachtung -7 bis 0%. Während die Be-

obachtung jedoch Einflüssen von zwei Seiten, Schwankungen der Nachfrage einerseits und der natürlichen Variabilität der Zuflüsse andererseits, ausgesetzt ist, kennt die Berechnung nur die Variabilität der Zuflüsse. Im Mittel ist die Trinkwasserproduktion des Ecker-Werkes sehr gut getroffen. Bis zum Ende der Achtzigerjahre lief das Werk, einmal abgesehen von Wartungsintervallen, unter Volllast. Da die Talsperre im Vergleich zu den anderen Talsperren eine geringere Rohwasserqualität aufweist (Lange, Harzwasserwerke GmbH, mündliche Mitteilung), wurde die Produktion des Wasserwerks in den Neunzigerjahren wegen sinkender Nachfrage gedrosselt. Das Langzeitkontinuumsmodell kann solche nachfragebedingten Bedarfsschwankungen nicht abbilden, da dadurch die Annahme des konstanten Betriebs verletzt würde.

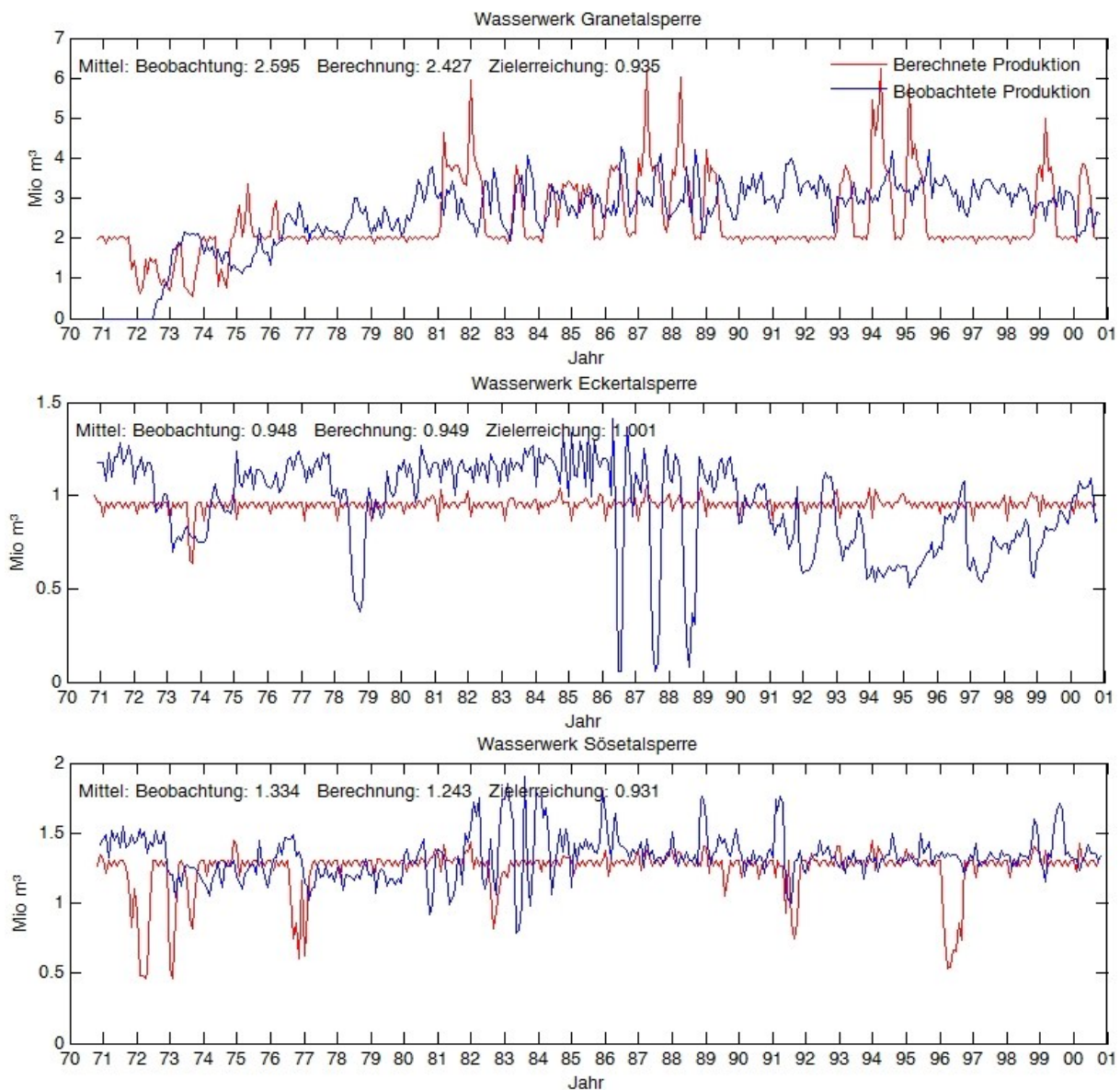


Abbildung 7-18: Monatliche beobachtete und berechnete Trinkwasserproduktion in den drei Wasserwerken des Talsperrenbetreibers.

7.2.1.6 Kalibrierung der Abflüsse an den Pegeln unterhalb der Talsperren

Ein besonders hartes Kriterium für die Güte der Modellkalibrierung ist der Abfluss an den Pegeln unterhalb der Talsperren. Dies soll am Beispiel der in Abbildung 7-19 diskutiert werden. Sie zeigt den vom Autor so bezeichneten ‚Knoten Okertal‘, die für eine Kalibrierung anspruchsvollste Stelle des Westharzmodells.

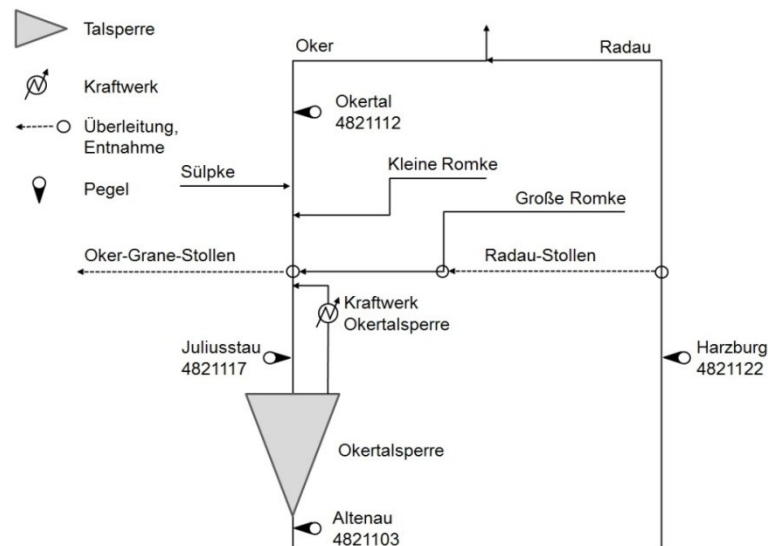


Abbildung 7-19: ‚Knoten Okertal‘, die für eine Kalibrierung anspruchsvollste Stelle des Westharzmodells.

Für eine zutreffende Abbildung des Abflusses am Pegel Okertal müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- Die Abgabe aus der Okertalsperre muss gut getroffen sein. Dies lässt sich aus den Talsperreninhalten ablesen.
- Die Überleitung von der Radau durch den Radaustollen muss gut abgebildet sein. Dies lässt sich nur anhand der Jahresmengen der Überleitungen beurteilen, da sie für das Langzeitkontinuum in höherer Auflösung nicht veröffentlicht sind.
- Die Überleitung in den Oker-Grane-Stollen muss ebenfalls gut getroffen sein. Auch dies lässt sich nur anhand der Jahresmengen der Überleitungen beurteilen.

Es ist daher ein wirklich schwieriges Unterfangen, eine gute Modelleffizienz für den Pegel Okertal zu erreichen. Ähnlich schwierig stellt sich die Situation für den Pegel Herzog-Julius-Hütte unterhalb der Granetalsperre dar. Trotz der nicht genau zu treffenden Überleitungen durch den Oker-Grane-Stollen muss die Wasserwerksentnahme gut abgebildet werden. Etwas einfacher ist die Situation am Pegel Mariental unter der Sösetalsperre und am Pegel Dreierherrenbrücke unterhalb der Eckertalsperre, wo neben der Talsperrenabgabe die nur in Monatssummen bekannte Wasserwerksentnahme getroffen werden muss. Vergleichsweise einfach ist die Situation unterhalb der Innerste- und Odertalsperre, da diese nicht durch Wasserwerksentnahmen beeinflusst sind.

Die Abbildung 7-20 zeigt die für die Pegel unterhalb der Talsperren erreichten Ergebnisse. Die Reihenfolge der Pegel entspricht der der Talsperren in Abbildung 7-14. Angesichts der vorangegangenen Diskussion darf es nicht verwundern, dass die Gütemaße geringer ausfallen als für die Zeitreihen der Talsperreninhalte. Dies ist jedoch für den nachfolgenden Modelleinsatz nicht nachteilig, da dort die Ermittlung und Bewertung der Unterschiede im Vor-

dergrund steht, die beim Antrieb des Talsperrenmodells mit Daten aus Klimamodellen für die Vergangenheit und Zukunftsprojektionen entstehen.

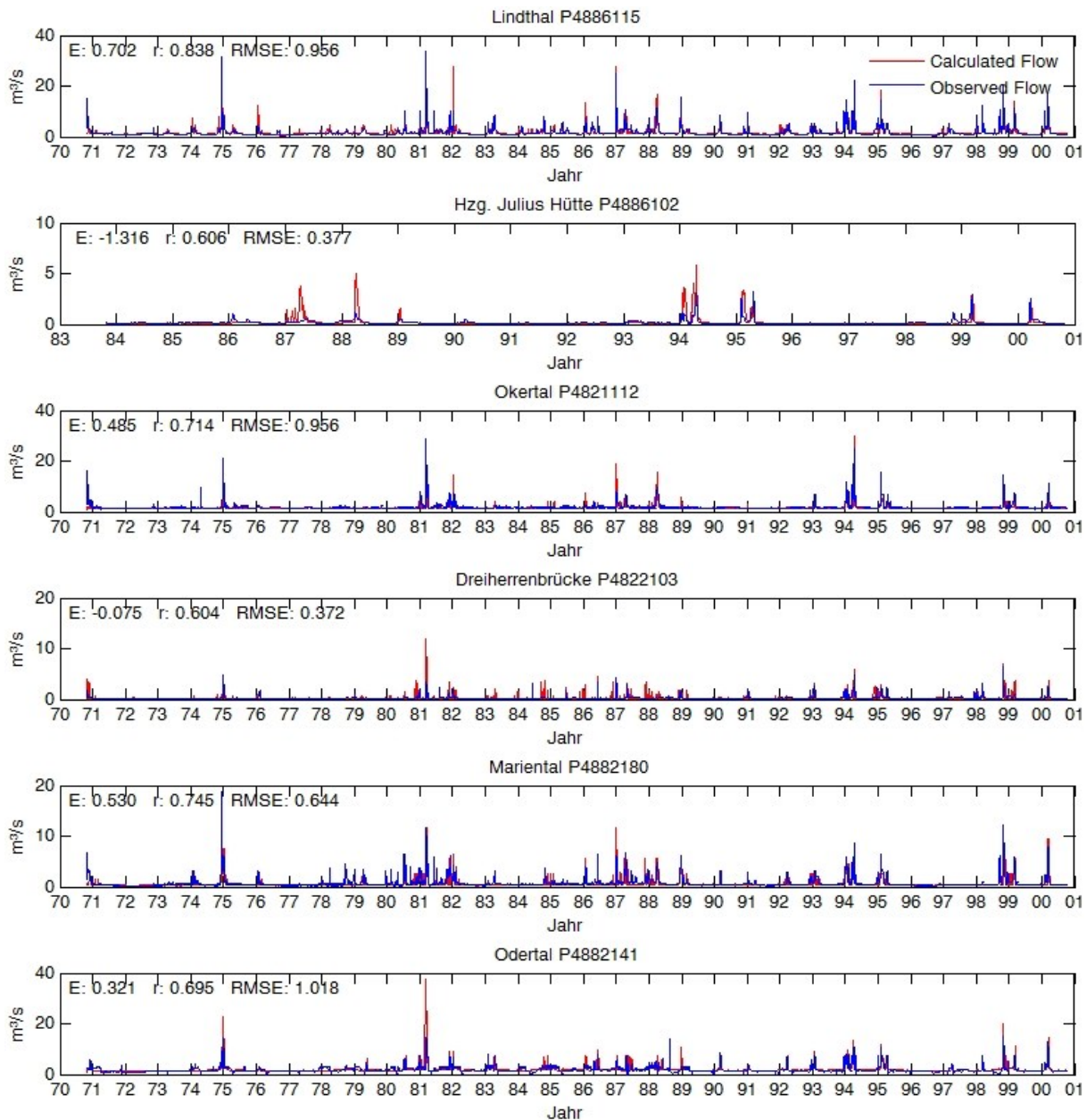


Abbildung 7-20: Abflüsse an den Pegeln unterhalb der Talsperren im Vergleich mit Beobachtungswerten für die Zeitreihe 1971-2000 auf Tagesbasis.

Sehr gute Ergebnisse zeigt der Pegel Lindthal unterhalb der Innerstetalsperre. Aufgrund zu großer Überleitungen in nassen Jahren, die durch das stationäre Modell bedingt sind, treten am Pegel Herzog-Julius-Hütte unterhalb der Granetalsperre zu hohe Abflussscheitel auf. Die gut getroffene Niedrigwasserabgabe kann dies nicht ausgleichen. Angesichts der komplexen Situation unterhalb der Okertalsperre sind die Ergebnisse für den Pegel Okertal mit einer Effizienz bei 0,5 sehr gut. Erstaunlich schwierig erscheint die Situation am Pegel Dreiherrenbrücke. Obwohl der Talsperreninhalt der Eckertalsperre sehr gut abgebildet wurde, ist die Effizienz für den Pegel negativ. Dies liegt in der stark schwankenden Produktion des Trinkwasserwerkes begründet. Gute Ergebnisse zeigt der Pegel Mariental unterhalb der Sösetalsperre, akzeptabel sind diejenigen für den Pegel Odertal unterhalb der Odertalsperre.

7.2.2 Kalibrierung mit Stundenwerten der Zeitreihe 2000 – 2008

7.2.2.1 Kalibrierung der Hochwasserscheitel

Hochwasserwellen aus den kleinen Einzugsgebieten oberhalb der Talsperren sind steil und kurz. Für ein Modell zur Untersuchung des Hochwassermanagements wurden daher von Haberlandt et al. (2010) bereitgestellte stündliche Niederschlagsdaten für die Zeitreihe vom 01.01.2002 bis zum 31.12.2008 verarbeitet. Für die anderen Klimavariablen konnte der Tageszeitschritt beibehalten werden. Hoch aufgelöste Beobachtungsdaten wurden vom Talsperrenbetreiber zur Verfügung gestellt. Die Abbildung 7-21 zeigt das Ergebnis der Kalibrierung für die jährlichen Maxima der Tagesmittelwerte.

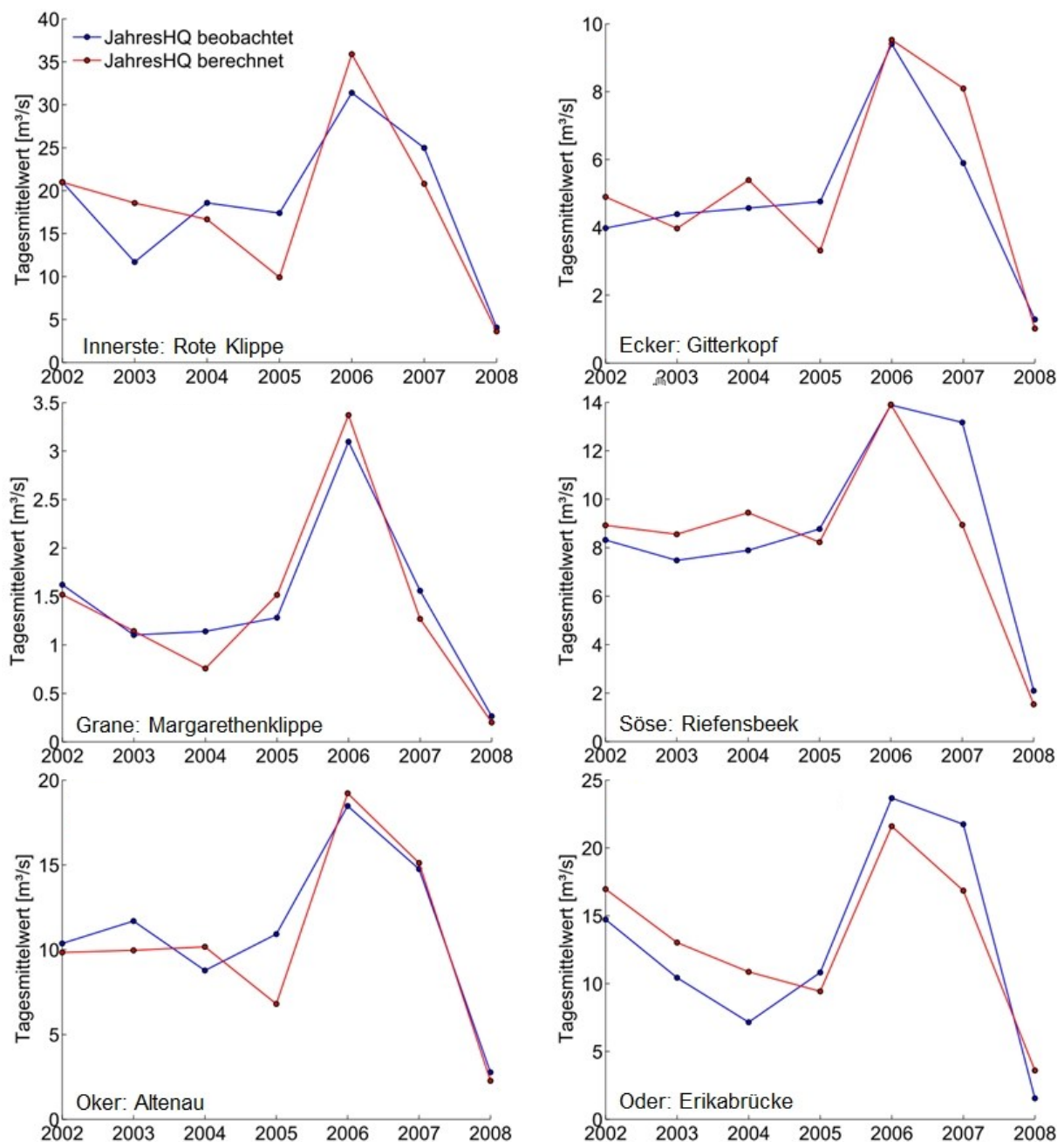


Abbildung 7-21: Tagesmittelwerte des Jahreshöchstabflusses aus der Kalibrierung auf Stundenbasis. Beobachtung und Berechnung für die Zeitreihe 2002–2008 an den Talsperrenzuflüssen.

Für Innerste und Grane wurde das Extremereignis 2007 leicht überschätzt, besonders gut gelang die Wiedergabe der Hochwasserscheitel für die Oker bei Altenau, die Ecker am Pegel Gitterkopf und die Söse bei Riefensbeek. Am Zufluss zur Odertalsperre wurden die kleinen Hochwässer überschätzt, die großen hingegen unterschätzt. Wegen der Länge der Zeitreihe von nur 7 Jahren ist die Angabe von statistischen Gütemaßen nicht sinnvoll. Angesichts der Tatsache, dass es sich hier um eine Berechnung mit stündlichen Werten in kleinen Einzugsgebieten des Mittelgebirges handelt, ist das Ergebnis der Kalibrierung an den Talsperrenzuflüssen als gut zu bewerten. Eine Kalibrierung an Stundenwerten der jährlichen Maxima führte nicht zu befriedigenden Ergebnissen.

7.2.2.2 Kalibrierung der Speicherinhalte

Eine gute Wiedergabe der Talsperreninhalte zeigen die Dauerlinien der Abbildung 7-22 bei der Berechnung im Stundenzeitschritt für Oker-, Söse- und Odertalsperre, weniger gut ist sie für Innerste-, Grane- und Eckertalsperre.

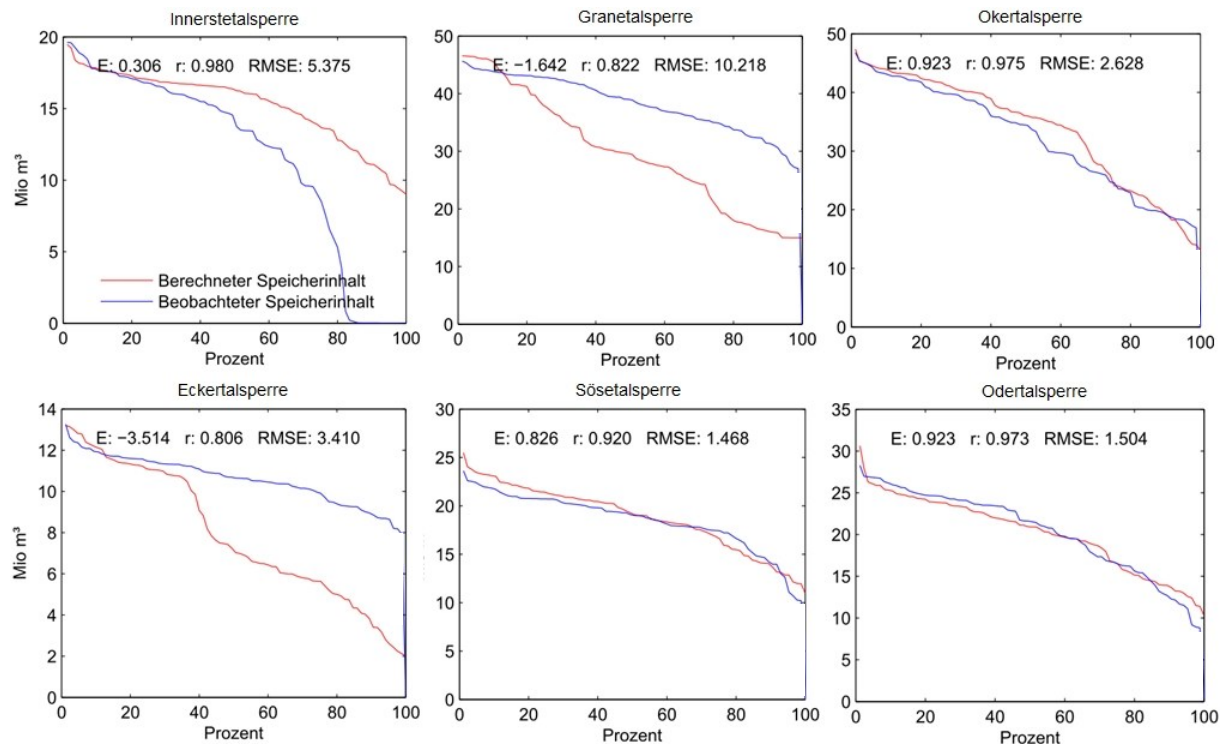


Abbildung 7-22: Dauerlinien der Talsperreninhalte aus der Kalibrierung mit Stundenwerten.

Mit Hilfe der Abbildung 7-23 lassen sich die Probleme dieser hoch aufgelösten Kalibrierung mit kurzer Zeitreihe gut erläutern. Da die Innerstetalsperre im Jahr 2004 wegen einer Grundüberholung abgelassen war, muss die berechnete Dauerlinie über der Beobachtung liegen. Die Kalibrierung kann nur anhand der Jahre davor und danach beurteilt werden. Diese zeigen eine gute Wiedergabe der Talsperreninhalte. Für die Grane-Talsperre werden die Jahre 2003 und 2008 sehr gut abgebildet, in den Jahren 2004 bis 2007 sind die Überleitungen zu gering. Dem entsprechend liegt die Dauerlinie der berechneten Inhalte unter der Beobachtung. Die Okertalsperre wird in den Jahren 2002 und 2003 gut wiedergegeben, nicht hingegen in den darauf folgenden Jahren. In der Dauerlinie gleichen sich Über- und Unterschätzungen jedoch aus. Die Eckertalsperre zeigt in Dauerlinie und Zeitreihe ein Bild, das an die Granetalsperre erinnert. Eine gute Abbildung im ersten und letzten Jahr wird von einer deut-

lichen Unterschätzung in den Jahren dazwischen unterbrochen. Allerdings stimmt bei der Eckertalsperre die qualitative Wiedergabe der Talsperreninhalte.

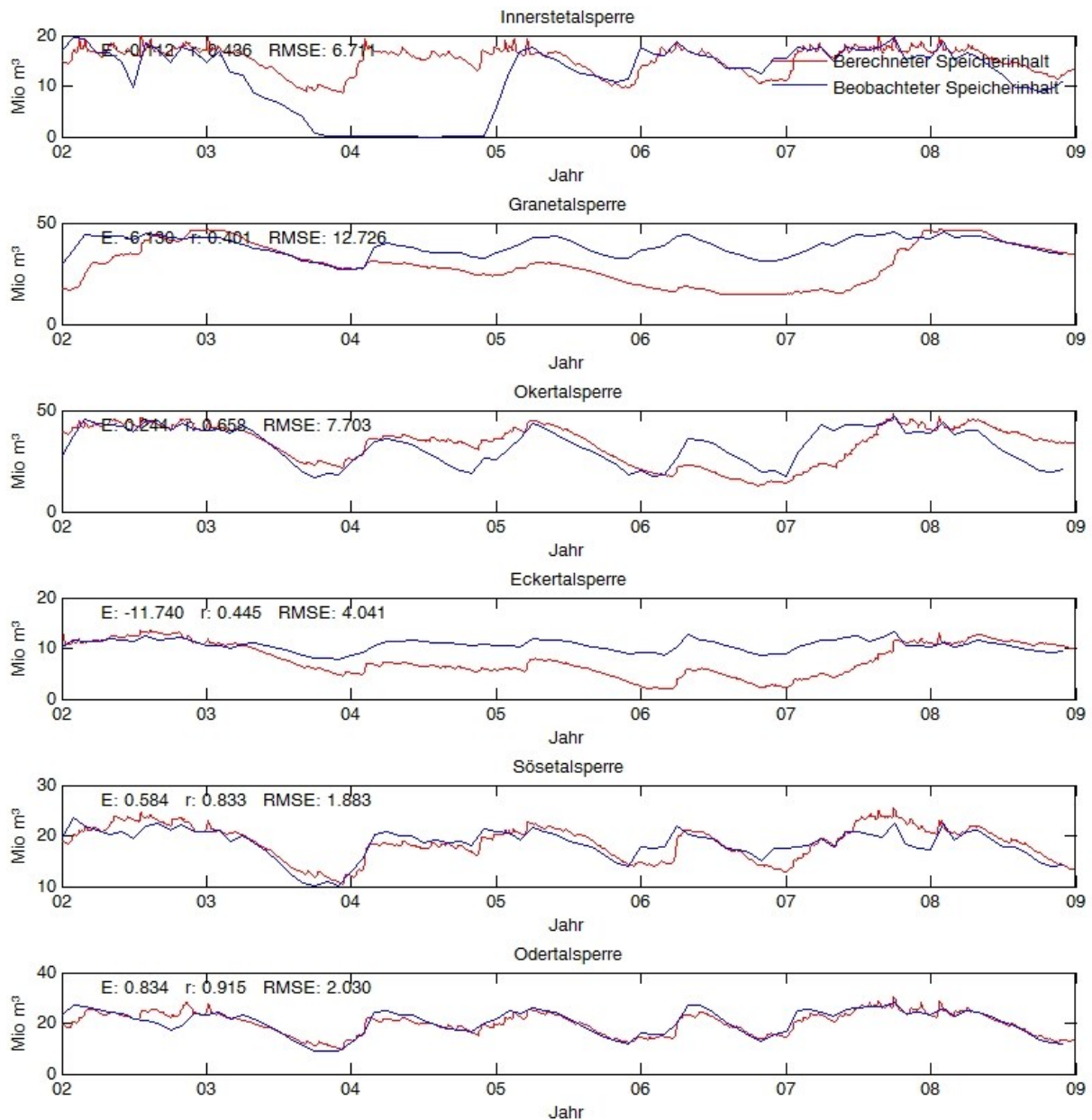


Abbildung 7-23: Beobachtete und berechnete Talsperreninhalte auf Stundenbasis, beobachtete Werte als Speicherinhalt am Monatsende.

Eine mögliche Erklärung ist eine Unterschätzung der Niederschläge auf dem Brocken in den Jahren 2003 bis 2008 in der stündlichen Interpolation. Die Eckertalsperre erhält große Teile ihrer Zuflüsse aus der westlichen Hanglage des Brockens. Auch die Radau, aus der große Teile der Überleitungsmengen zur Granetalsperre stammen, ist von Staulagen am Westhang des Brockens beeinflusst. Söse- und Odertalsperre zeigen, dass die Kalibrierung auf Stundenbasis mit kurzer Zeitreihe möglich ist.

Für die spätere Optimierung des Hochwasserschutzes ist eine gute Wiedergabe der maximalen Speicherinhalte wichtig. Die Abbildung 7-24 zeigt daher die beobachteten und berechneten Stauhöhen für die Innerstetalsperre. Stauhöhen werden direkt an der Staumauer bzw. dem Staudamm gemessen und können durch die Inhaltslinie in den Speicherinhalt

transformiert werden. Sie lagen für die Untersuchung als Viertelstundenwerte vor und wurden zu einstündigen Werten aggregiert.

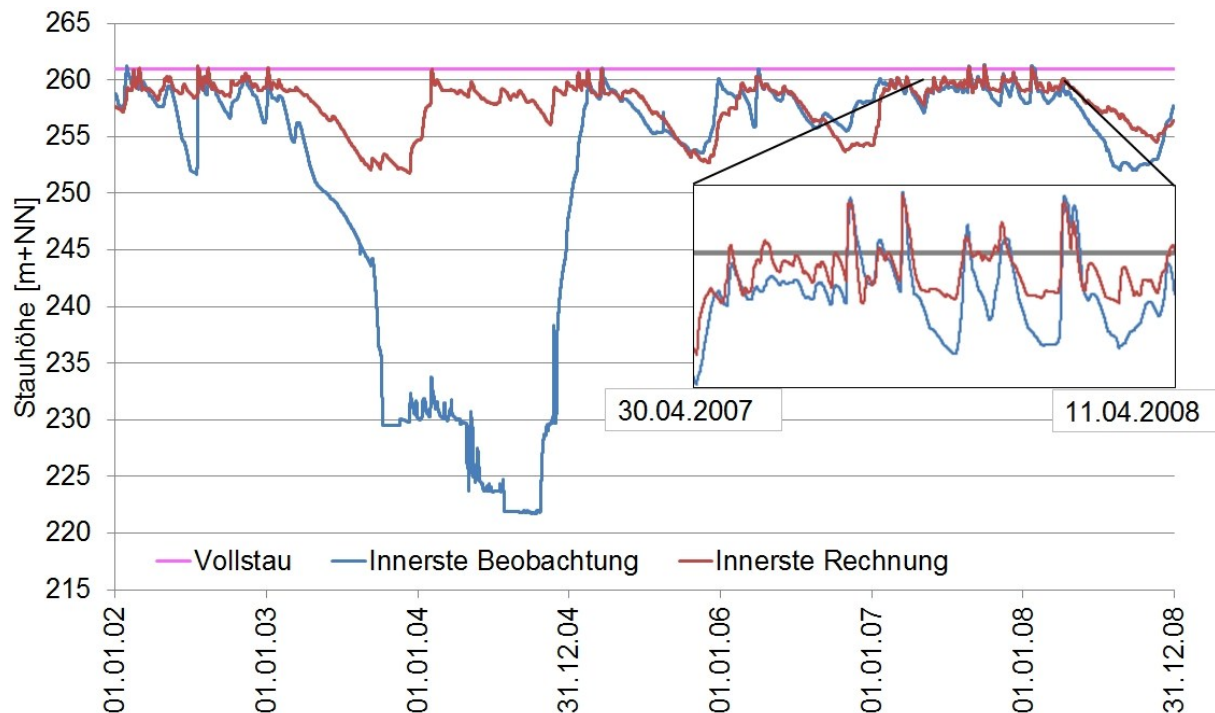


Abbildung 7-24: Vergleich der beobachteten und berechneten Stauhöhen an der Innerstetalsperre für die Zeitreihe 2002–2008. Beobachtete Werte als Stundenwerte.

Wie bereits erwähnt, war die Innerstetalsperre im Jahr 2004 in Revision und wurde seit Mitte 2003 abgelassen. Dies kann die Kalibrierung des Stundenmodells nicht wiedergeben. Die Ausschnittvergrößerung für den Zeitraum vom 30.04.2007 bis zum 11.04.2008 zeigt eine gute Wiedergabe der Spitzeninhalte für die Innerstetalsperre. Daher kann von einer realitätsnahen Berechnung der Abgaben ausgegangen werden.

Die Abbildung 7-25 stellt die Stauhöhen der Okertalsperre dar. Hier werden die Spitzeninhalte ebenfalls gut, aber nicht so gut wie an der Innerstetalsperre abgebildet. Die Abbildung 7-26 schließlich zeigt die Stauhöhen für die Sösetalsperre. Auch hier gibt es einzelne Punkte, an denen der Spitzeninhalt sehr gut getroffen wurde. Allerdings wird insbesondere im Jahr 2002 und 2007 der Inhalt deutlich zu hoch berechnet. Daher überschätzen die in Abbildung 7-27 gezeigten berechneten Abgaben wahrscheinlich die in der Realität aufgetretenen. Ein Vergleich mit den tatsächlichen Abgaben ist nicht möglich, da die Daten nicht verfügbar waren. Es ist aber wahrscheinlich, dass die beobachteten Abgaben geringer waren, da diese kurzen und steilen Entlastungsereignisse mit geringem Volumen durch ein situatives Abgabemanagement, also ein von der Talsperrenaufsicht genehmigtes Abweichen von den Betriebsplänen durch Vor- oder Parallelentlastung, zu verhindern sind. Das hier vorgestellte Modell ist kein Echtzeitbetriebssystem, in dem sich solche Managementoptionen darstellen ließen. Es kennt nur die Betriebspläne und deren strikte Einhaltung.

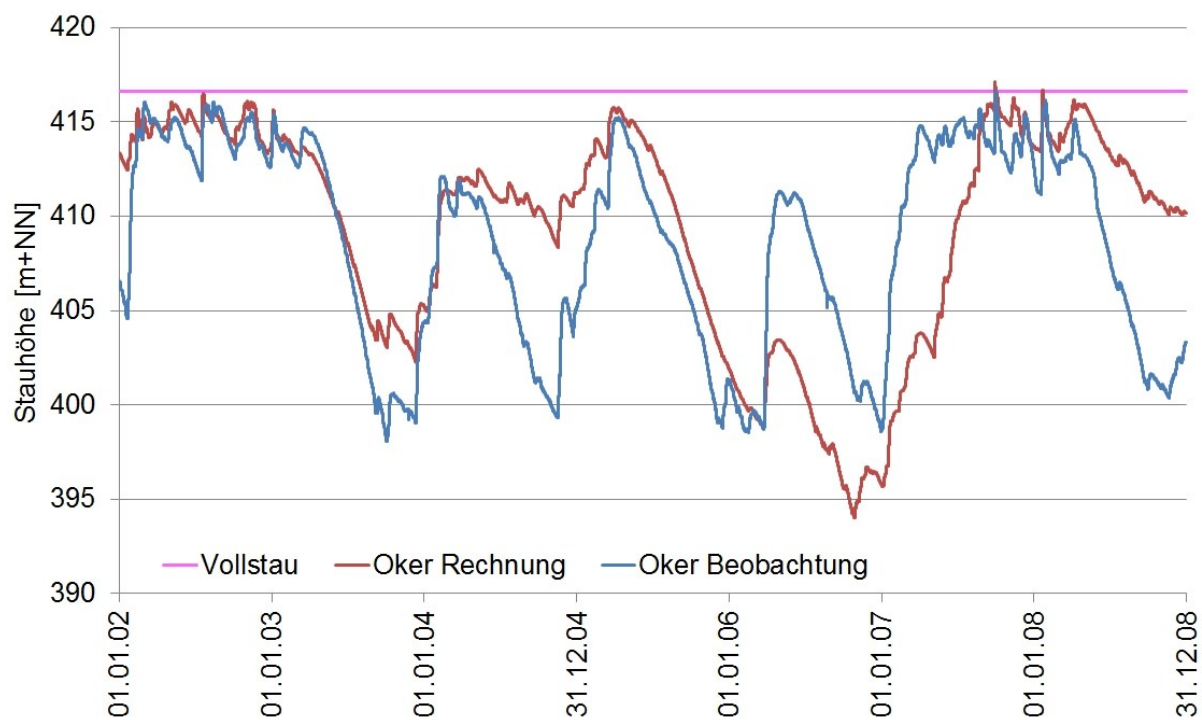


Abbildung 7-25: Vergleich der beobachteten und berechneten Stauhöhen an der Okertalsperre für die Zeitreihe 2002–2008. Beobachtete Werte als Stundenwerte.

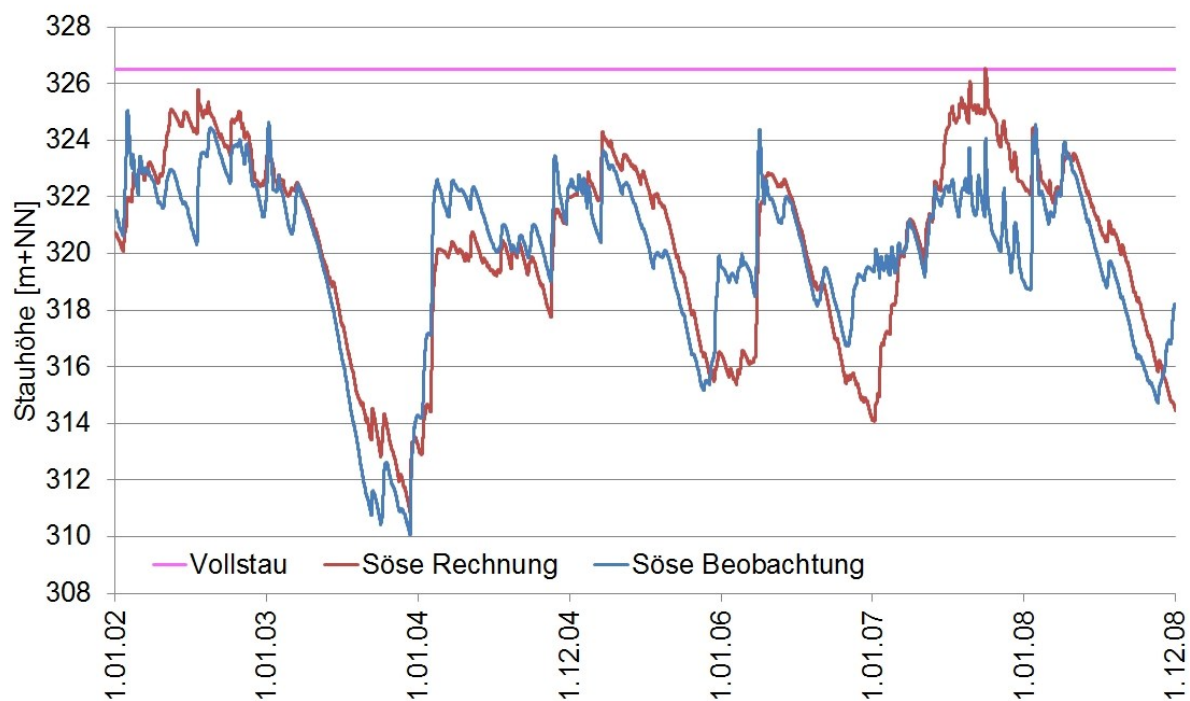


Abbildung 7-26: Vergleich der beobachteten und berechneten Stauhöhen an der Sösetalsperre für die Zeitreihe 2002–2008. Beobachtete Werte als Stundenwerte.

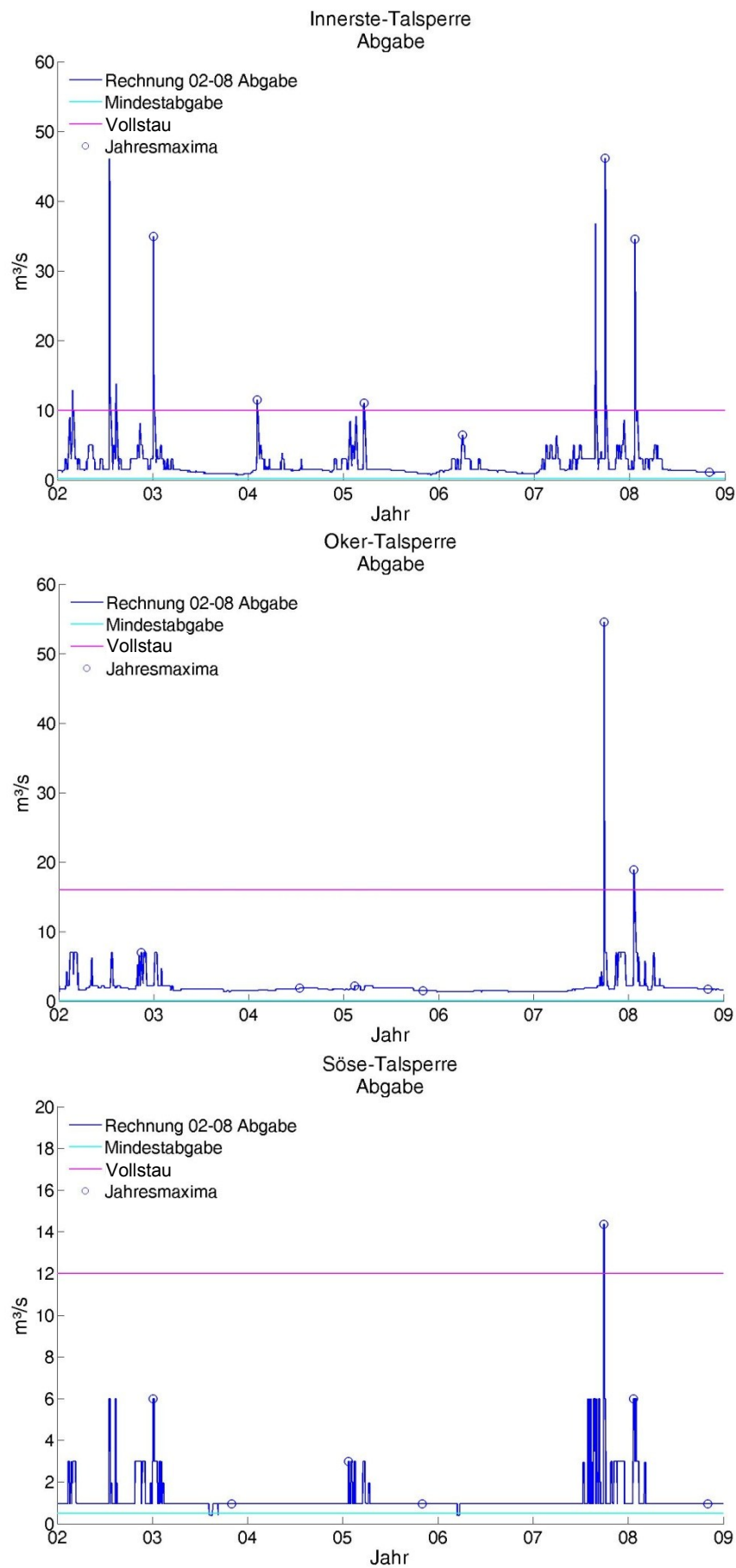


Abbildung 7-27: Berechnete Abgaben für Innerste-, Oker- und Sösetalsperre für die Zeitreihe 2002–2008.

Abbildung 7-28 zeigt abschließend die Abflüsse an den Pegeln unterhalb der Talsperren. Die Wiedergabe gelingt für diejenigen Talsperren gut, deren Inhalte gut wiedergegeben wurden.

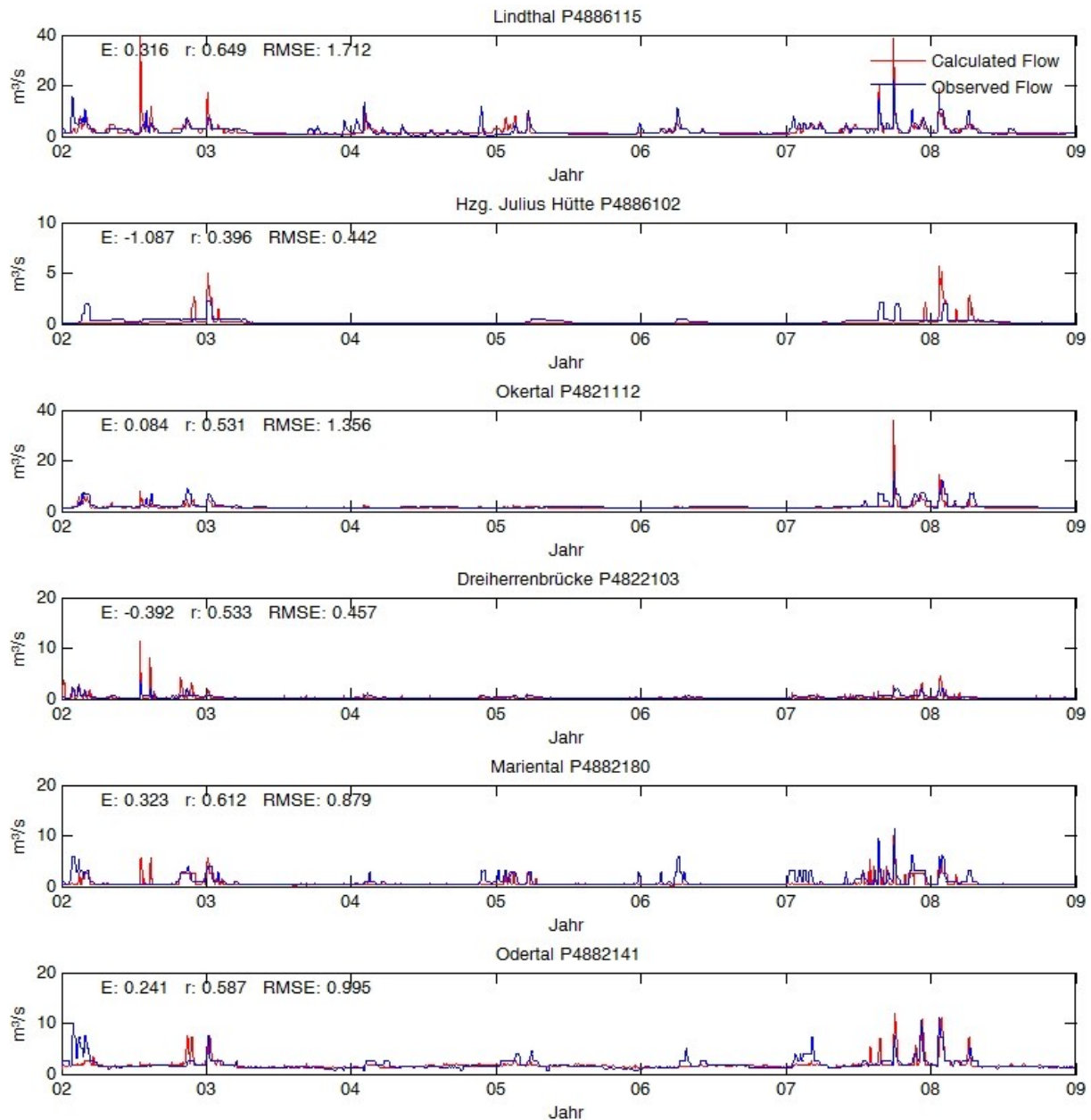


Abbildung 7-28: Abflüsse an den Pegeln unterhalb der Talsperren aus der Simulation mit Stundenwerten.

Das Ergebnis für den Pegel Lindthal unterhalb der Innerste-Talsperre ist angesichts der Tatsache, dass die Talsperre im Jahr 2004 in Revision war, gut. Allerdings werden einige Hochwasserscheitel deutlich überschätzt. Am Pegel Herzog-Julius-Hütte unter der Granetalsperre werden Hochwasserscheitel aufgrund nicht begrenzter Überleitungen zu hoch angegeben. Da der Inhalt der Talsperre unterschätzt wurde, kann im Niedrigwasserbereich keine gute Übereinstimmung erzielt werden. Recht gut ist das Ergebnis für den Pegel Okertal. Abflüsse im Niedrig- und Hochwasserbereich werden gut wiedergegeben, der extreme Hochwasserscheitel im Jahr 2007 wird überschätzt. Die Wiedergabe der Abflüsse am Pegel Dreiherrenbrücke ist angesichts der schlechten Wiedergabe der Inhalte der Eckertalsperre nicht

überraschend. Für die Pegel Mariental unter der Sösetalsperre und Odertal unter der Oderalsperre konnten hingegen gute Ergebnisse erzielt werden.

7.2.2.3 Kalibrierung der Wasserwerke

Die Trinkwasserentnahmen wurden nicht neu kalibriert, sondern aus dem für den Tageszeitschritt kalibrierten Modell übernommen. Die Abbildung 7-29 zeigt das Ergebnis der Berechnung. Ein Vergleich der Gütemaße mit den in Abbildung 7-18 für die lange Zeitreihe der Tageswerte dargestellten zeigt eine etwas höhere Berechnung der Trinkwasserproduktion im Stundenzeitschritt-Modell. Für die Granetalsperre werden zu geringe Produktionsmengen im zweiten Halbjahr 2006 durch erhöhte Produktionsmengen in den Jahren 2002/2003 und 2007/2008 überkompensiert. Die Gesamtentnahme wird um 12% überschätzt.

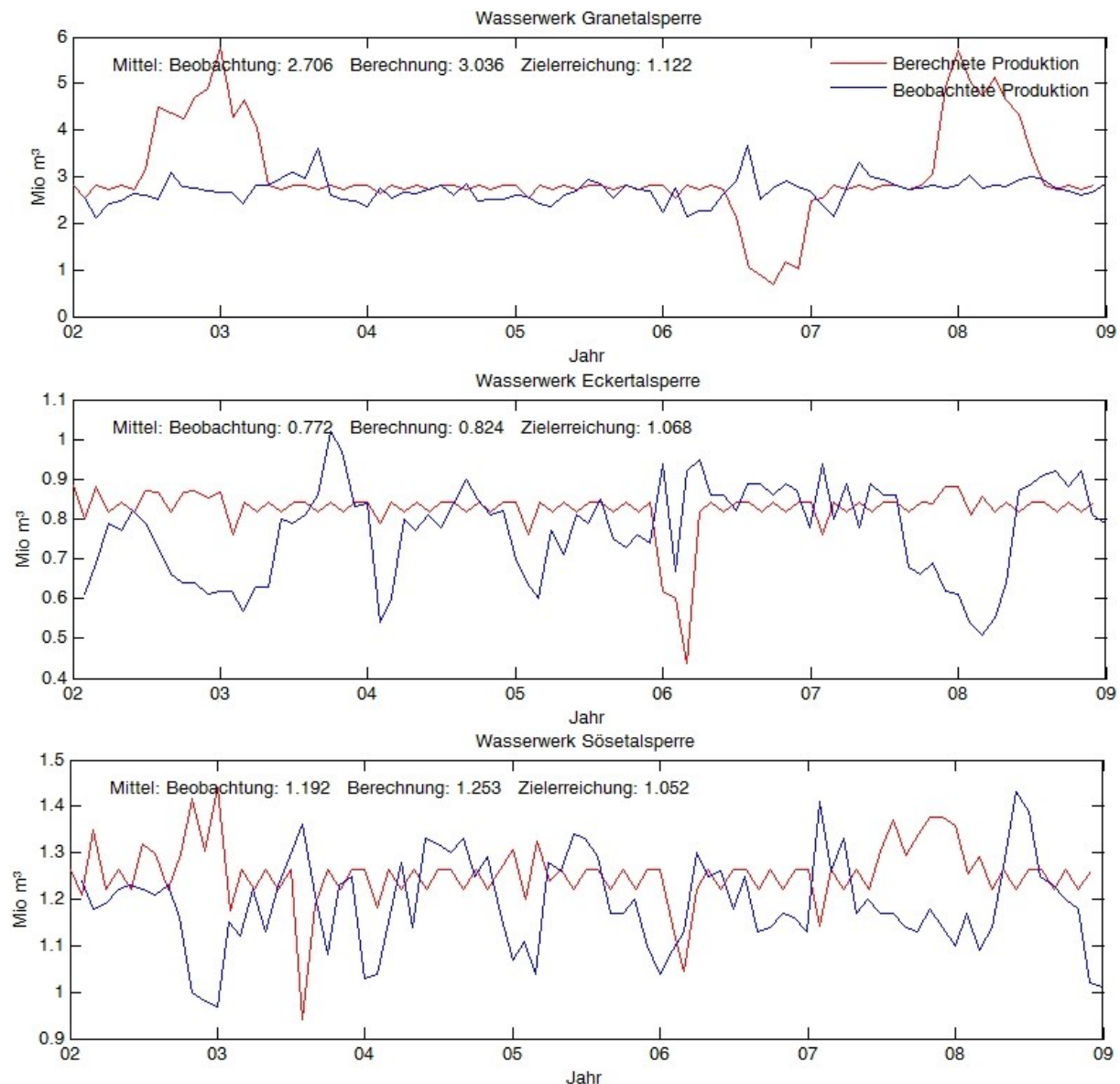


Abbildung 7-29: Vergleich der berechneten und beobachteten monatlichen Trinkwasserproduktion für die Zeitreihe 2002-2008.

Für die Ecker- und Sösetalsperre liegen die berechneten Entnahmen im Mittel der Zeitreihe 5 bis 7% über den beobachteten Werten. Damit sind die Ergebnisse für eine Beurteilung von Klimawandelszenarien gut geeignet.

7.2.2.4 Kalibrierung der Energieerzeugung

Angaben zur Energieerzeugung macht der Talsperrenbetreiber in den jährlichen Geschäftsberichten. Abbildung 2-10 auf Seite 32 zeigt die Jahressummen nach Talsperren aus dem Geschäftsbericht des Jahres 2010. Die Werte für die Jahresreihe 2002-2008 dienten der Kalibrierung der Energieerzeugung. Die einzelnen Turbinen der Kraftwerke konnten mit den Angaben aus HWW (2008) parametrisiert und mittels des Leistungsbeiwertes feinkalibriert werden. Die Energieerzeugung P berechnet sich nach Giesecke und Mosonyi (2009, S. 31) zu:

$$P = c_p * Q * h_f \text{ [kW]} \quad 13$$

wobei Q der Durchfluss, h_f die Nettodruckhöhe und c_p der Leistungsbeiwert ist. Letzterer fasst pauschal die Wirkungsgrade von Turbine, Generator und Transformator zusammen. Er bewegt sich zwischen 7 und 9 und ist für die hier vorliegende Fragestellung die für die Kalibrierung geeignete Größe. Eingangsgrößen für die Berechnung waren Wasserstand und Abgabe aus dem für Stundenwerte kalibrierten Modell. Da in PANTA RHEI derzeit die Ermittlung der Energieproduktion nicht vorgesehen ist, wurde diese nachgeordnet in einer vom Autor erstellten MATLAB-Routine berechnet.

Die Abbildung 7-30 zeigt die Produktion der einzelnen Turbinen des Talsperrenbetreibers, zu denen die des Kraftwerks der Innerstetalsperre nicht zählen. Die Berechnung ist jedoch auch für dieses vorgesehen. Die Granetalsperre ist mit dem kleinsten Kraftwerk ausgerüstet. Die Berechnung ist mit Ausnahme des zweiten Halbjahres 2006 gut. In diesem Zeitraum oszilliert sie wegen der diskutierten zu niedrigen Wasserstände und Abgaben aus dem Speicher.

Der Intervallbetrieb im Kraftwerk der Okertalsperre stellt sich in Abbildung 7-30 als geschlossenen grüne Fläche dar. Die Änderungen der Produktionsmenge spiegeln die veränderlichen Speicherinhalte wieder.

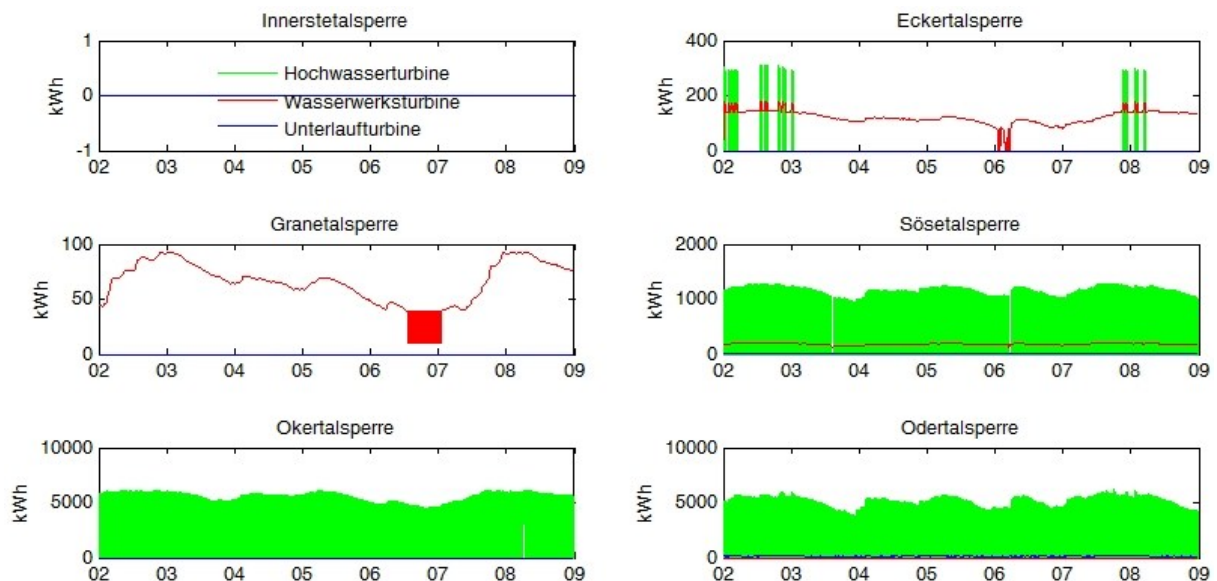


Abbildung 7-30: Berechnete Energieerzeugung nach Talsperren für die Turbinen des Talsperrenbetreibers.

Die Hochwasserturbine der Ecker-Talsperre ist in der untersuchten Zeitreihe selten in Betrieb, was ebenfalls durch zu geringe Speicherinhalte in den Jahren 2003 bis 2007 zu erklären ist. Anfang 2006 bricht auch die Produktion der Wasserwerksturbine analog zur Trinkwasserproduktion ein. Die Sösetalsperre ist, wie in Abbildung 2-11 gezeigt, die einzige mit drei Turbinen ausgerüstete Talsperre. Die Odertalsperre verfügt über eine Hochwasser- und eine Unterlaufturbine.

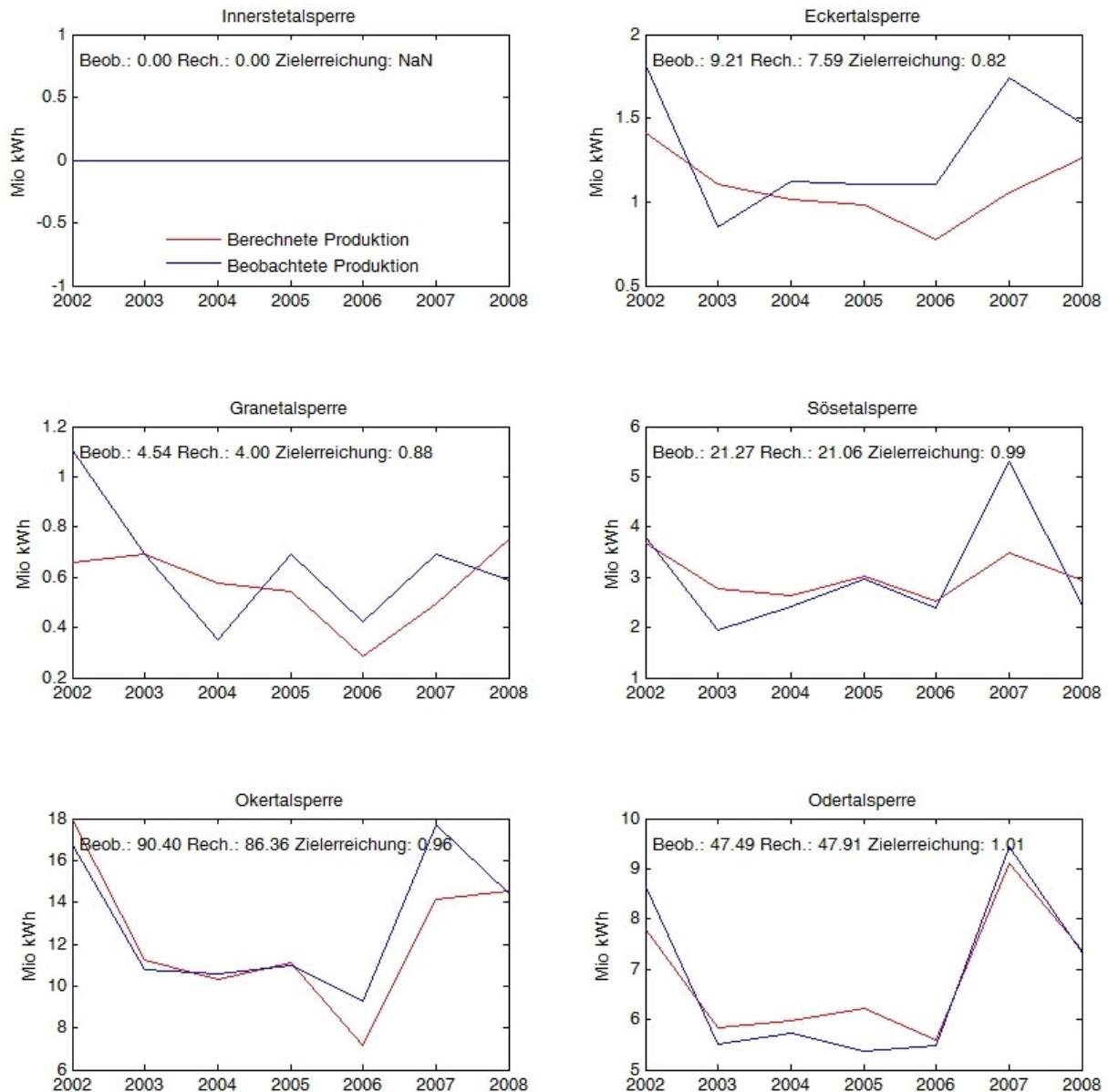


Abbildung 7-31: Vergleich der berechneten jährlichen Produktion für die Jahresreihe 2002–2008, Summen der gesamten Zeitreihe (Meon und Gocht, 2012, verändert).

Die Abbildung 7-31 vergleicht die berechneten Produktionsmengen mit der Beobachtung aus Abbildung 2-10. Die Summe über die Zeitreihe wird in der Okertalsperre um vier Prozent unterschätzt, die Energieproduktion an Grane- und Eckertalsperre hingegen um zwölf bis 18%, was auf die in Abbildung 7-23 gezeigte Unterschätzung der Speicherinhalte zurückzuführen ist. Eine Überschätzung trockener Jahre wie 2003 wird an der Sösetalsperre durch die Unterschätzung der hohen Produktion im Jahr 2007 kompensiert. Das beste Ergebnis

wurde für die Odertalsperre erzielt. Diese weist in Abbildung 7-23 auch die beste Übereinstimmung von beobachtetem und berechnetem Speicherinhalt auf.

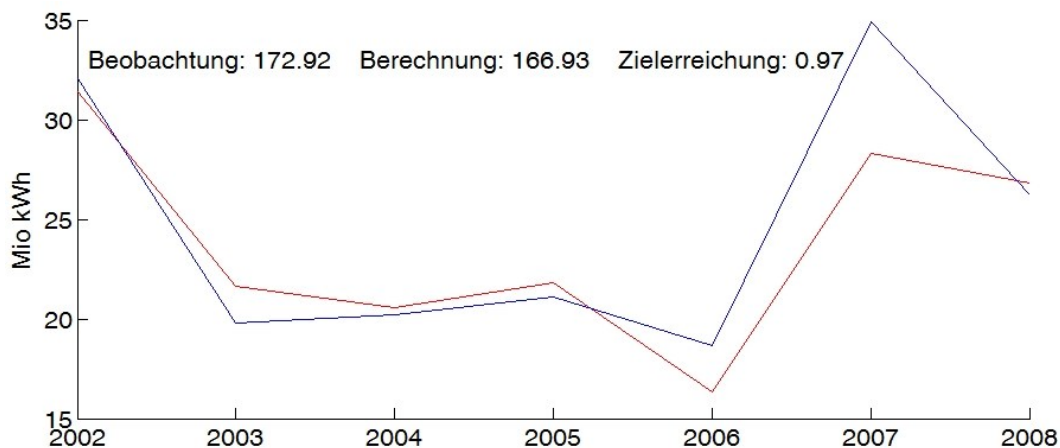


Abbildung 7-32: Vergleich der berechneten und beobachteten Energieproduktion an den Talsperren.

Die Abbildung 7-32 fasst die Energieproduktion aller Talsperren zusammen. In der Summe wird sie um drei Prozent unterschätzt, was angesichts der Unsicherheiten in Datengrundlage und Kalibrierung ein sehr gutes Ergebnis ist. Dies kann aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass die nichtlineare Energieproduktion mit dem hier verfolgten Ansatz nur näherungsweise wiedergegeben werden kann. Ein konstanter Leistungsbeiwert für alle Betriebszustände führt zur Unterschätzung nasser und Überschätzung trockener Jahre. In der Realität ändert sich der Wirkungsgrad mit Durchfluss und Druckhöhe. Höher aufgelöste Beobachtungsdaten hätten eine bessere Berücksichtigung dieses Zusammenhanges erlaubt. Das Ergebnis ist für die Beurteilung des Klimawandel-Einflusses, also den Vergleich langjähriger Mittelwerte von simulierter Zukunft und Vergangenheit, gut geeignet, nicht hingegen für ein Echtzeitbetriebssystem, das stundengenaue Ergebnisse fordert.

7.2.3 Validierung

Die Validierung ist eine Überprüfung der Modellqualität auf der Grundlage eines für die Kalibrierung nicht verwendeten Zeitraums. Im Allgemeinen weist sie geringere Gütemaße als die Kalibrierung auf. Wie in Abschnitt 4.3 ausgeführt, kann nach Merz et al. (2009) allerdings erwartet werden, dass bei einem Kalibrierungszeitraum von 30 Jahren hohe Gütemaße bei der Validierung erreicht werden. Dies bestätigt sich für das Modell im Tageszeitschritt, welches anhand der Zeitreihe vom 01.11.2000 bis 30.04.2009 aus Haberlandt et al. (2010) validiert werden konnte.

Die Tabelle 7-6 zeigt das Ergebnis der Validierung im Vergleich mit der Kalibrierung. Für die Zulaufpegel 1 bis 6 ist das Ergebnis mit einer Ausnahme sehr gut. Bezüglich der Modelleffizienz liegen die Pegel Margarethenklippe und Gitterkopf sogar knapp über dem Kalibrierungsergebnis. Lediglich der Pegel Erikabrücke zeigt deutlich geringere Werte.

Bezüglich der Ablaufpegel 7 bis 12 unterhalb der Talsperren gilt für die Validierung dasselbe wie für die Kalibrierung. Alle Fehler des Modells kumulieren in diesen Pegeln, auch solche aus Effekten, die in der Kalibrierung nicht berücksichtigt werden konnten, wie veränderliche Trinkwasserentnahme oder zeitlich veränderliche Überleitung. Angesichts dieser Tatsachen

sind die Ergebnisse der Validierung gut, an den Pegeln Mariental und Odertal sogar besser als bei der Kalibrierung.

Tabelle 7-6: Gütemaße für die Validierung des Modells auf Tagesbasis für den Zeitraum 2001–2009 im Vergleich mit der Kalibrierung.

Pegel	Kalibrierung			Validierung		
	E	r	RMSE	E	r	RMSE
1 Rote Klippe	0,838	0,892	0,85	0,796	0,904	0,04
2 Margarethenklippe	0,715	0,821	0,10	0,719	0,825	0,10
3 Altenau	0,756	0,830	0,63	0,739	0,822	0,66
4 Gitterkopf	0,541	0,783	0,39	0,601	0,818	0,38
5 Riefensbeek	0,708	0,836	0,51	0,705	0,837	0,56
6 Erikabrücke	0,707	0,843	0,79	0,274	0,828	1,28
7 Lindthal	0,702	0,838	0,96	0,459	0,653	1,50
8 Herzog Julius Hütte	-1,316	0,606	0,38	-0,261	0,605	0,32
9 Okertal	0,485	0,714	0,96	0,093	0,277	1,25
10 Dreierherrenbrücke	-0,075	0,604	0,37	-0,426	0,509	0,44
11 Mariental	0,530	0,745	0,64	0,544	0,544	0,88
12 Odertal	0,321	0,695	1,02	0,473	0,616	0,78
13 Harzburg	0,729	0,820	0,24	0,540	0,764	0,30

An letzter Stelle ist der sonst nicht erwähnte Pegel Harzburg an der Radau mit guten Werten für Kalibrierung und Validierung gezeigt. Er ist wichtig, da er oberhalb der Abzweigung des Radaustollens liegt und damit die Überleitungen in die Granetalsperre beeinflusst.

Bei dem Modell im Stundenzeitschritt wurde die gesamte siebenjährige Zeitreihe 2002-2008 für die Kalibrierung verwendet. Die Verwendung des Mindestzeitraums von 5 Jahren nach Merz et al. (2009) hätte dazu geführt, dass die Innerstetalsperre über den größeren Teil des Kalibrierungszeitraums zu hohe, Grane- und Eckertalsperre hingegen zu geringe Speicherinhalte aufgewiesen hätten. Nur die Verwendung der gesamten Zeitreihe verleiht den Ergebnissen Plausibilität. Eine Validierung war daher nicht möglich.

7.3 Diskussion: Langzeitkontinuumsmodell versus Echtzeitbetriebssystem

Die guten bis sehr guten Ergebnisse zeigen, dass die Modellstruktur des Westharzmodells geeignet ist, Langzeitkontinuen für kleine Einzugsgebiete im Mittelgebirge mit integriertem Talsperrenbetrieb zu modellieren. Die komplexen Verhältnisse beispielsweise am ‚Knoten Okertal‘ ließen sich in einem Modell, das Wasserhaushaltsberechnung und Talsperrenbetrieb trennt, nicht darstellen.

In diesem Kapitel wird aber auch deutlich, worin sich ein Modell zur Berechnung von Langzeitkontinuen und ein Echtzeitbetriebssystem unterscheiden. Letzteres benötigt zusätzlich dynamische (zeitvariante) Verzweigungen, die darüber hinaus auf den Zustand entfernter Systemelemente, zum Beispiel den Speicherinhalt einer Talsperre, reagieren können.

Auch das Systemelement ‚Talsperre‘ bedarf der Überarbeitung. Im Modell für Langzeitkontinuen hat die Talsperre nur eine Abgabe. Diese muss summarisch Trinkwasserentnahme,

Energieproduktion und Hochwasserentlastung abbilden. In der Realität sind dafür mehrere Entnahmemöglichkeiten vorgesehen. Ein Problem stellt die derzeitige Lösung beispielsweise an der Granetalsperre dar. Ihr Wasserwerk nimmt das Rohwasser nicht unterhalb der Stau-mauer auf, sondern pumpt es direkt aus dem Speicher. Dies lässt sich derzeit nicht im Modell abbilden. Zur Lösung des Problems musste die Rohwasserentnahme unterhalb der Talsperre angeordnet und die Wasserwerksentnahme der Talsperrenabgabe zugeschlagen werden - eine mögliche, aber aufwändige Prozedur.

Die Abbildung der Energieproduktion als integralem Bestandteil eines Echtzeitbetriebssystems müsste durch ein bisher nicht vorhandenes Systemelement ‚Kraftwerk‘ abgebildet werden, das die nichtlinearen Zusammenhänge zwischen Druckhöhe, Durchfluss und Wirkungsgrad sauber auflöst. Dieses Element ließe sich sowohl an den Talsperren als auch im Leitungssystem einsetzen.

schlag von 1 472 mm/a liegt südlich des Bruchbergs, westlich versetzt gegen das höchste Niederschlagsgebiet aus der Interpolation. Die Lage ist recht gut getroffen, jedoch fallen in WETTREG 2006 die höchsten Niederschläge nicht über dem Einzugsgebiet der Oder, sondern über dem der Sieber. Auch ist die Niederschlagshöhe um rund 130 mm/a zu gering. Ähnliches gilt für den Vergleich der Isohyeten. WETTREG weist eine in der Lage der Interpolation ähnliche Isohyete mit einem Jahresniederschlag von 1 400 mm/a auf. Die vergleichbare Isohyete aus der Interpolation hat einen um 100 mm höheren Niederschlag und schließt den Brocken ein. In den niedrigeren Lagen des Westharzes, insbesondere im Nord- und Südwesten, stimmen die Niederschläge gut überein. Diese Unterschiede gegenüber der der Kalibrierung zugrunde liegenden Interpolation sind hilfreich bei der Interpretation der als Dauerlinien gezeigten Talsperreninhalte in Abbildung 8-2.

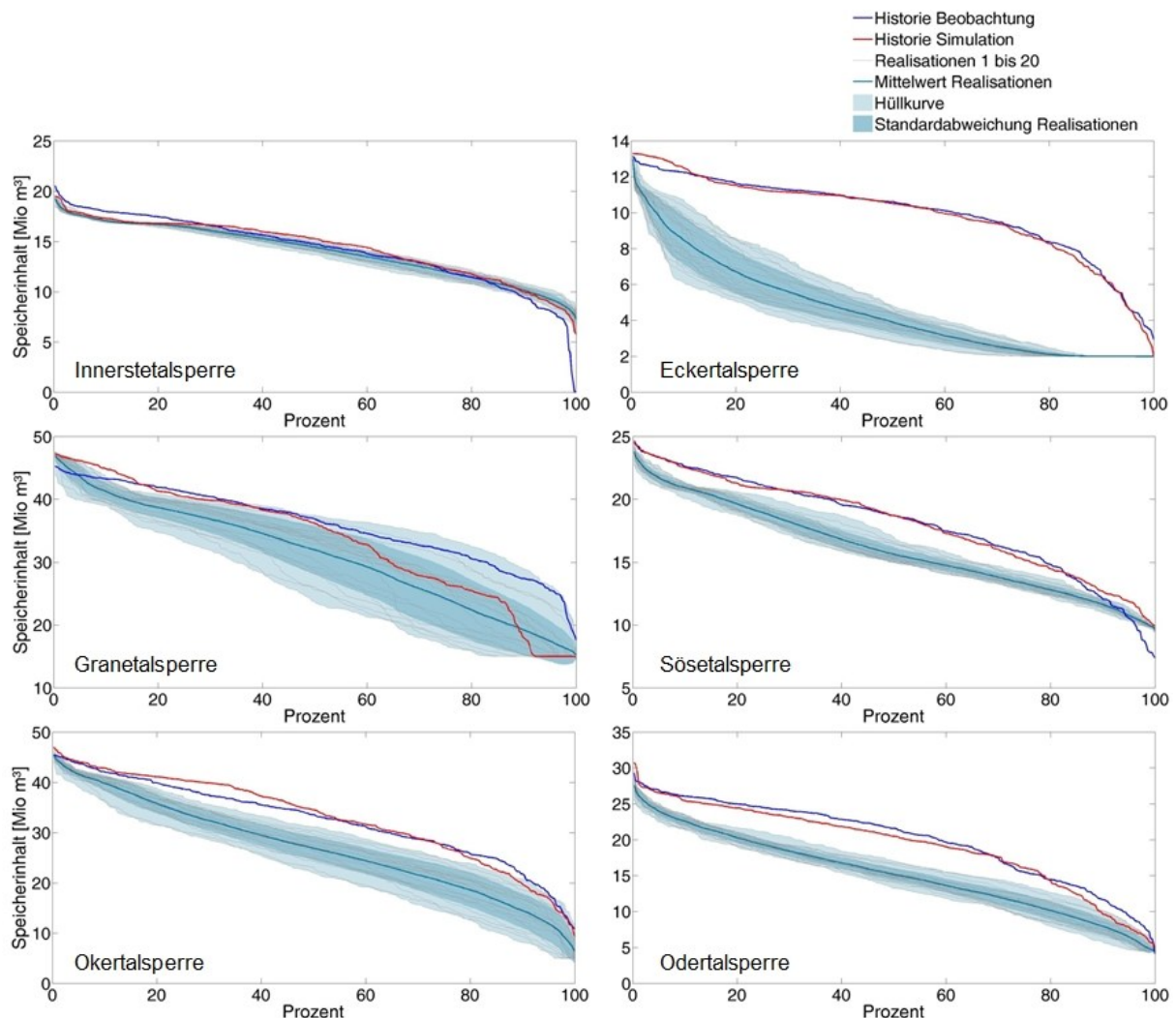


Abbildung 8-2: Dauerlinien der Talsperreninhalte für die Zeitreihe 1971-2000 für 20 Realisationen von WETTREG 2006 sowie Beobachtung und Simulation.

Die Innerstetalsperre im Nordwesten des Untersuchungsgebiets lässt sich mit den WETTREG-Daten sehr gut darstellen. Über weite Bereiche der Dauerlinie liegen Beobachtung und Simulation im Bereich der Hüllkurve der 20 WETTREG-Realisationen. Die stark von Überleitungen geprägte Granetalsperre wird recht gut wiedergegeben, allerdings wird hier eine Tendenz zu geringen Inhalten deutlich sichtbar. Große Teile des Einzugsgebiets der Oker oberhalb Altenau erhalten über 100 mm zu wenig Jahresniederschlag.

Während die Dauerlinien der Okertalsperre qualitativ gut übereinstimmen, verursachen die quantitativen Fehler eine Parallelverschiebung der WETTREG-Ergebnisse nach unten. Bei der Eckertalsperre sind die Auswirkungen der geringeren WETTREG-Niederschläge sehr drastisch. Sie sollte nach der Interpolation 1 400 bis 1 500 mm Jahresniederschlag erhalten, aus WETTREG erhält sie rund 1 300 mm/a. Dies führt dazu, dass sie weder qualitativ noch quantitativ entsprechend der Kalibrierung wiedergegeben wird. Söse- und Odertalsperre weisen Verhältnisse ähnlich der Okertalsperre auf.

8.2 Modellierung der Zukunft mit Tageswerten aus WETTREG 2006

Auch wenn die quantitative Wiedergabe der Talsperreninhalte mit den Daten eines regionalen Klimamodells nicht gelingt, bleiben qualitative Aussagen über zukünftige Entwicklungen möglich. Dies wird anhand von Abbildung 8-3 diskutiert.

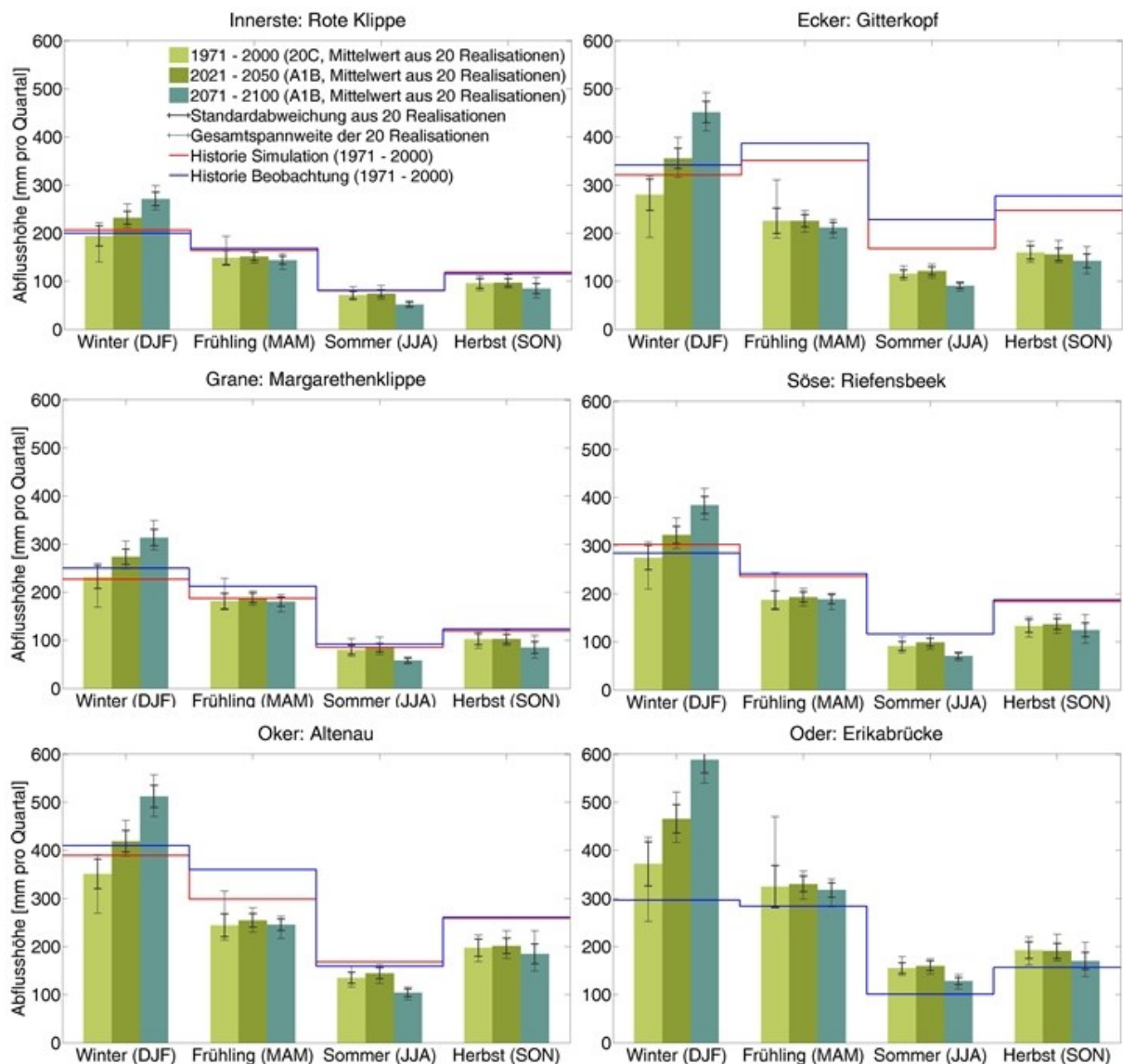


Abbildung 8-3: WETTREG 2006: Langfristige Entwicklung an den Zulaufpegeln des Untersuchungsgebiets in Quartalsmittelwerten.

Sie zeigt die Talsperrenzuläufe nach Jahreszeiten für Vergangenheit und Zukunft im Vergleich mit Beobachtung und Simulation. Es ist nach der Diskussion der Speicherinhalte nicht erstaunlich, dass für die Innerstetalsperre Beobachtung, Simulation und die Berechnungen für die Vergangenheit mit WETTREG 2006 sehr gut übereinstimmen. Die Zukunftsprojektion von WETTREG 2006 ergibt einen Anstieg der Abflüsse im Winterquartal um rund 50 mm für die nahe Zukunft 2021-2050 und um weiterer 50 mm für die ferne Zukunft. Quasi unveränderten Abflüssen im Frühling folgt ein Sommer, der in der nahen Zukunft leicht erhöhte und erst in der fernen Zukunft um rund 20 mm verringerte Abflüsse aufweist. Der Herbst zeigt ein ähnliches Bild, allerdings auf höherem Niveau. Eine Zunahme in der nahen und Abnahme in der fernen Zukunft entspricht nicht der Erwartung eines stetigen Klimawandels hin zu trockeneren Sommern und feuchteren Wintern. Ähnliches beobachtete aber auch Brekke et al. (2009) in seinen Arbeiten zum Einfluss des Klimawandels auf die großen Speicher in Kalifornien. Die übrigen Zuflusspegel wiederholen die Ergebnisse des Pegels Rote Klippe an der Innerste auf unterschiedlichem Niveau.

Abbildung 8-4 stellt die Ergebnisse der Zukunftsprojektionen auf der Basis von WETTREG 2006 für die Pegel unterhalb der Talsperren dar.

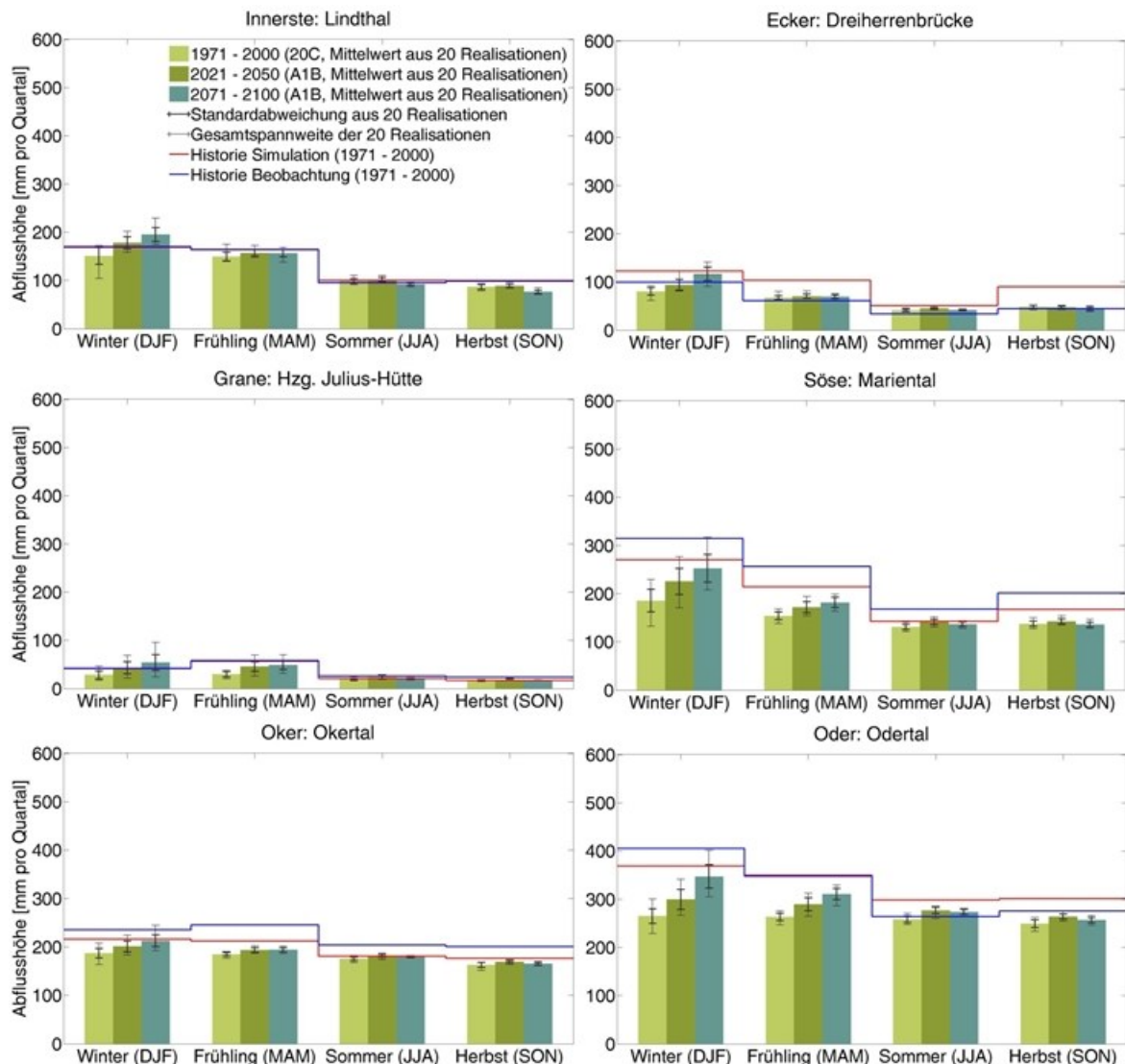


Abbildung 8-4: WETTREG 2006: Langfristige Entwicklung an den Ablaufpegeln des Untersuchungsgebiets in Quartalsmittelwerten.

In der Diskussion dieser Abbildung werden der Einfluss des Klimawandels und der des Talsperrensystems auf den Wasserhaushalt verglichen. Die mit Wasserwerken ausgestatteten Talsperren, besonders Grane- und Eckertalsperre, weisen an den Ablaufpegeln viel geringere Abflüsse als an den Zulaufpegeln auf. Die stark ausgleichende Wirkung der Talsperren auf den Wasserhaushalt ist für alle Talsperren klar ersichtlich. Der Jahresgang an den Zuflusspegeln mit hohen Abflüssen im Winter und geringen Abflüssen im Sommer wird durch die Talsperrenbewirtschaftung stark verringert. Besonders deutlich wird dies am Beispiel der Okertalsperre. Aber auch die projizierten Abflussveränderungen fallen an den Pegeln unterhalb der Talsperren geringer aus, als an ihren Zulaufpegeln. Im Nahbereich unterhalb der Talsperren überwiegt damit der Einfluss der Talsperrenbewirtschaftung den Einfluss des Klimawandels. Die Talsperren erscheinen als geeignetes Instrument, um klimabedingte Änderungen auszugleichen.

Obwohl die Untersuchung von Hochwasserextremen in kleinen Einzugsgebieten wegen steiler und kurzer Wellen auf Stundenwerten basieren sollte, wurde der Versuch unternommen, mit Tageswerten aus WETTREG 2006 Hochwasserstatistik zu betreiben. Die Abbildung 8-5 zeigt das Ergebnis für das hundertjährige Ereignis an den Zulaufpegeln des Talsperrensystems, ergänzt um den im hydrologischen Jahrbuch aufgeführten Pegel Hüttschenthal im Oberlauf der Innerste.

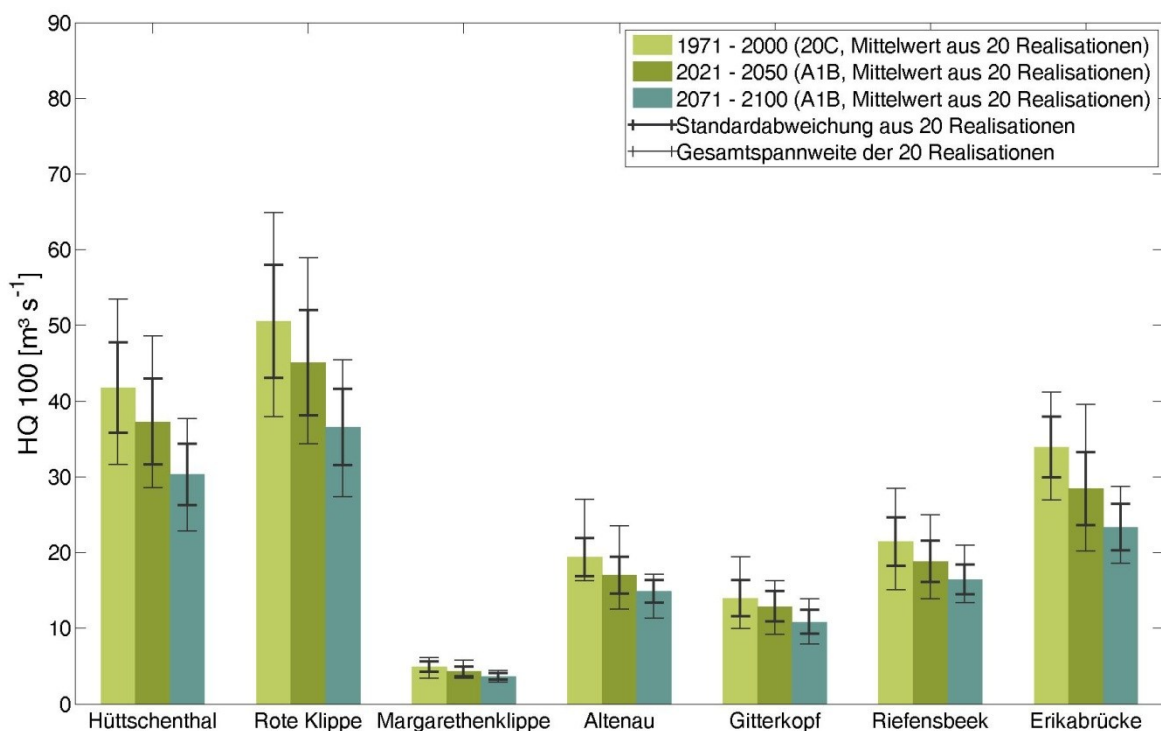


Abbildung 8-5: Entwicklung des HQ_{100} an den Zulaufpegeln des Talsperrensystems auf der Basis von WETTREG 2006.

Für die jeweils 30-jährigen Zeiträume von Vergangenheit sowie naher und ferner Zukunft wurde mittels der Gumbel-Verteilung unter Verwendung der Momentenmethode das HQ_{100} geschätzt. Alle Pegel zeigen eine deutliche Abnahme des Abflusses für dieses Ereignis in den Zukunftsprojektionen von WETTREG 2006. Dies steht im Gegensatz zu allen Erwartungen und wird in Meon et al. (2012) für das Einzugsgebiet der Aller so nicht bestätigt. Dort wurden drei WETTREG-Realisationen von Tages- zu Stundenwerten disaggregiert und ge-

meinsam mit REMO-Ergebnissen ausgewertet. Für das Einzugsgebiet der Aller ergab sich in Meon et al. (2012) ein starker Anstieg der Abflüsse kleinerer Eintrittswahrscheinlichkeiten und nur ein Anstieg im Bereich von 5 bis 10% für das HQ₁₀₀. Für den Westharz kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse von WETTREG 2006 keine geeignete Basis für die Untersuchung von Hochwasserextremen bilden. Dies führte zum Ausschluss von WETTREG 2006 aus der Optimierung des Talsperrenbetriebs bezüglich des Hochwasserschutzes.

8.3 Modellierung der Vergangenheit mit Stundenwerten aus REMO

Mit dem an der Zeitreihe 2002-2008 kalibrierten Modell auf Stundenbasis wurde zunächst die Vergangenheit des Klimamodells REMO nachgerechnet. Aus diesem Regionalmodell liegen zwei Läufe vor, REMO UBA und REMO BFG. Die Niederschlagsverteilung beider Läufe wird für die Vergangenheit im Vergleich mit der Interpolation aus Haberlandt et al. (2010) diskutiert. Hierfür zeigt die Abbildung 8-6 zunächst die Ergebnisse des REMO UBA-Laufs.

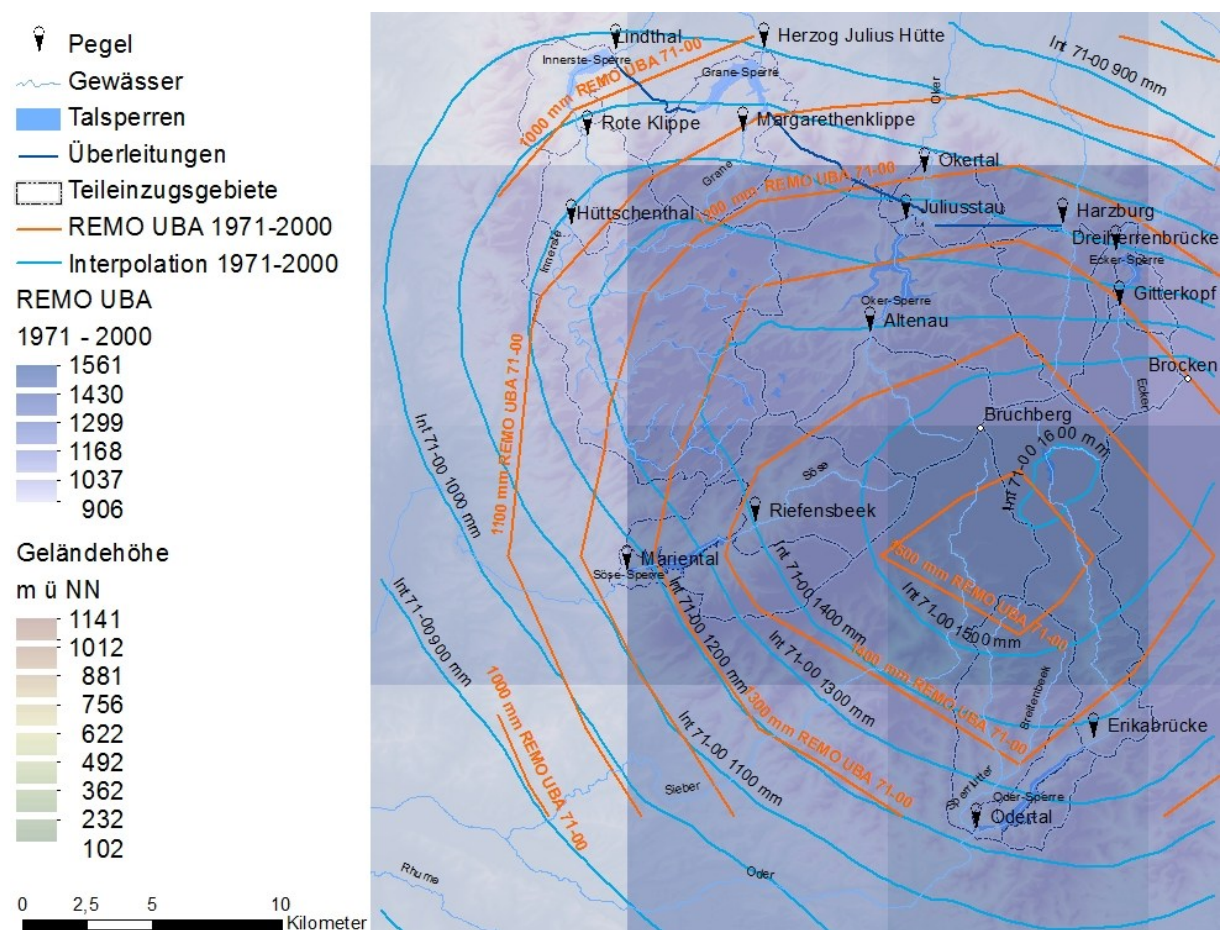


Abbildung 8-6: Langjährige Mittelwerte der Niederschläge aus REMO UBA für die Zeitreihe 1971-2000 im Vergleich mit der Interpolation von Haberlandt et al. (2010).

Die Ergebnisse von REMO liegen auf einem 100 km²-Raster vor. Die Rastergröße übersteigt damit die Größe aller Talsperreneinzugsgebiete bezogen auf den Zulaufpegel. Die Rasterzelle mit dem höchsten Gebietsniederschlag von 1 561 mm/a liegt südlich des Bruchbergs. Die daraus abgeleitete Isohyete mit 1 500 mm/a schneidet das Niederschlagsgebiet mit den Werten >1 600 mm aus der Interpolation. Damit liefert REMO UBA in diesem Bereich deutlich höhere Werte als WETTREG 2006.

Der Brocken erhält, im Bereich eines Gebietsniederschlags von 1 300 mm/a befindlich, 200 mm/a weniger Niederschlag als in der Interpolation. In den gemäßigten Höhenlagen des Harzes übersteigen die REMO-Niederschläge die der Interpolation um rund 100 mm/a.

Der in Abbildung 8-7 gezeigten REMO BFG-Lauf weist deutlich höhere Niederschläge als der REMO UBA-Lauf auf. Das Gebiet mit >1 500 mm Jahresniederschlag ist größer als in der Abbildung 8-6. In den gemäßigten Höhenlagen des Harzes liegen die Niederschläge um bis zu 200 mm über den Werten der Interpolation. Dennoch verharrt der Brocken im Bereich von Niederschlägen >1 300 mm. Dies sind wie im REMO UBA-Lauf 200 mm weniger als in der Interpolation von Haberlandt et al. (2010) und bis zu 400 mm weniger als in der Beobachtung der Harzwasserwerke.

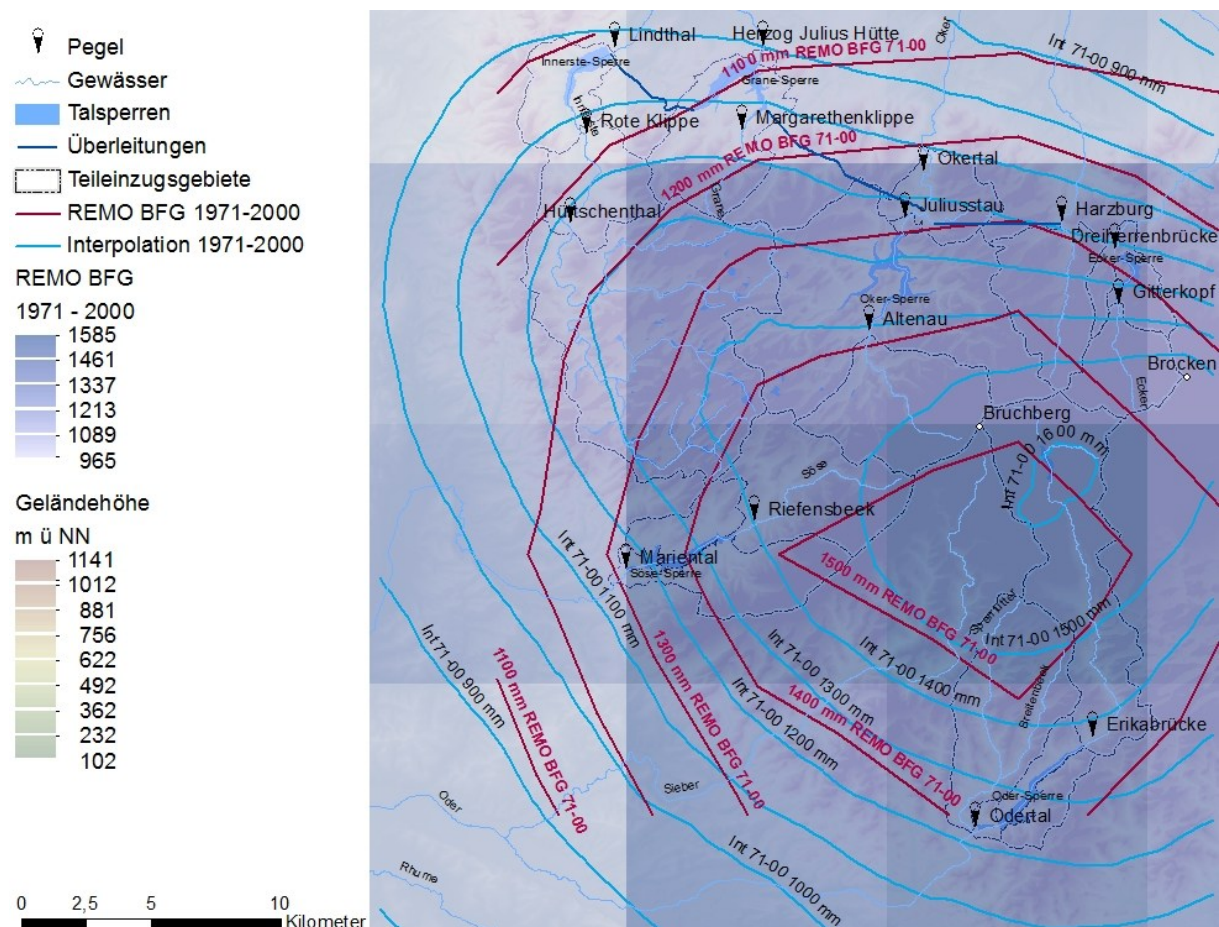


Abbildung 8-7: Langjährige Mittelwerte der Niederschläge aus REMO BFG für die Zeitreihe 1971-2000 im Vergleich mit der Interpolation von Haberlandt et al. (2010).

In den untersuchten Regionalmodellen WETTREG und REMO ist das Gebiet mit den höchsten Niederschlägen aus dem Bereich zwischen Brocken und Bruchberg in den Bereich südwestlich des Bruchbergs verschoben, je gröber die Auflösung des Modells, umso weiter. Die in Brocken und Bruchberg gegliederte Orografie des Hochharzes erscheint in den regionalen Klimamodellen als nur eine Erhebung, deren Gipfel etwas südwestlich des Bruchbergs aufragt. In dessen Luv erzeugen die Klimamodelle hohe Niederschläge. Das führt dazu, dass die eigentlich höchste Erhebung des Harzes in den Windschatten gerät und infolge dessen weit geringere Niederschläge als in Realität erhält. Für regionale Klimamodelle, die Aussagen für ganz Deutschland ermöglichen, ist der Harz sicherlich gut getroffen. Die Aufgaben-

stellung dieser Arbeit lässt eine höhere räumliche Auflösung von regionalen Klimamodellen allerdings wünschenswert erscheinen.

8.3.1 Talsperreninhalte

Abbildung 8-8 vergleicht die mit REMO errechneten Dauerlinien der Talsperreninhalte mit der Dauerlinie der Beobachtung. Die höheren Niederschläge aus REMO BFG schlagen sich in höheren Talsperreninhalten nieder. Während REMO UBA die Talsperreninhalte der Beobachtung für die Innerste und den Zeitraum 1971-2000 exzellent trifft, werden sie durch REMO BFG überschätzt.

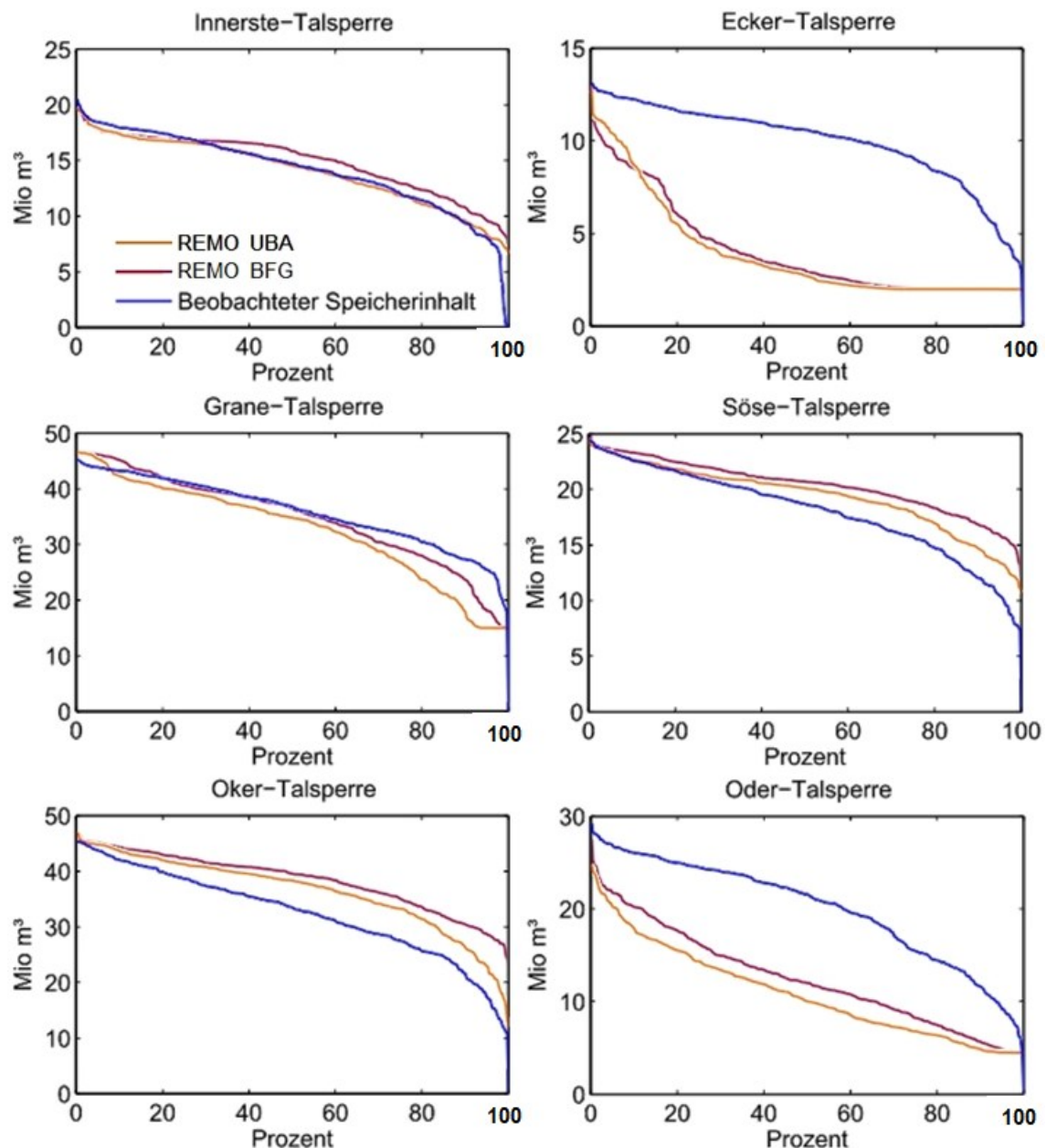


Abbildung 8-8: Vergleich der Dauerlinien der Talsperreninhalte, berechnet mit REMO UBA und REMO BFG für die Vergangenheit.

Umgekehrt wird die Granetalsperre mit dem BFG-Lauf besser getroffen als mit dem UBA-Lauf. Oker- und Sösetalsperre werden durch beide Läufe des Klimamodells über-, Ecker und

Odertalsperre hingegen unterschätzt. Insgesamt ist das Ergebnis des UBA-Laufs etwas besser als dasjenige des BFG-Laufs. Die zu geringen Beiträge zum Zufluss aus dem Hochharz machen sich in Ecker- und Odertalsperre deutlich bemerkbar. Die Wiedergabe der Dauerlinie ähnelt in beiden Läufen der Wiedergabe in WETTREG 2006, wobei die Oder-Talsperre durch WETTREG 2006 besser abgebildet wurde.

8.3.2 Trinkwasser- und Energieproduktion

In der Tabelle 8-1 werden langjährige Mittelwerte der Trinkwasser- und Energieproduktion aus den REMO-Läufen für die Vergangenheit den Kalibrierungsergebnissen aus Abbildung 7-29 und Abbildung 7-31 gegenübergestellt. Für den Kalibrierungszeitraum sind die Beobachtungswerte mit aufgeführt.

Die monatliche Trinkwasserproduktion wurde in der Kalibrierung für Ecker und Söse um fünf bis sieben Prozent, für die Grane um zwölf Prozent überschätzt. Während der UBA-Lauf die Trinkwasserproduktion für Grane und Söse sehr gut trifft, wird die Eckertalsperre wegen zu geringer Speicherinhalte nicht gut reproduziert. Die Ergebnisse des BFG-Laufs liegen geringfügig über denen des UBA-Laufs, auch hier kann die Eckertalsperre nicht gut wiedergegeben werden.

Die Energieproduktion wurde in der Kalibrierung an Grane- und Eckertalsperre unterschätzt, was durch zu geringe Speicherinhalte erklärbar ist. Für Oker-, Söse- und Odertalsperre wurde die Energieproduktion hingegen gut bis sehr gut getroffen. Der UBA-Lauf überschätzt die Energieproduktion an der Grane um fünf Prozent und unterschätzt Oker und Söse sehr wenig. Deutlich schlechter sind die Ergebnisse für die zu leeren Talsperren Ecker und Oder. Der BFG-Lauf produziert etwas höhere Werte als der UBA-Lauf, aber auch er muss naturgemäß an zu leeren Talsperren die Energieproduktion unterschätzen.

Tabelle 8-1: Vergleich von Trinkwasser- und Energieproduktion der Harzwasserwerke für die Kalibrierung und die Wiedergabe der Vergangenheit in REMO UBA und REMO BFG.

	Kalibrierung 2002-2008		REMO 20C 1971 - 2000	
	Beobachtung	Rechnung	UBA	BFG
Trinkwasserproduktion		Mio m ³ /Monat		
Grane	2,71	3,036	3,027	3,261
Ecker	0,77	0,824	0,629	0,681
Söse	1,19	1,253	1,243	1,264
Energieproduktion		Mio kWh/Jahr		
Grane	0,65	0,57	0,60	0,65
Oker	12,91	12,34	12,07	12,77
Ecker	1,32	1,08	0,62	0,68
Söse	3,04	3,01	2,91	3,16
Oder	6,78	6,84	3,65	4,16

Sowohl Trinkwasser- als auch Energieproduktion können sowohl für Kalibrierung als auch Modellierung der Vergangenheit mit REMO konsistent mit den Talsperreninhalten erklärt werden. Weiterhin wird das Kalibrierungsergebnis – so die Talsperreninhalte gut wiederge-

geben werden – stabil durch die REMO-Daten reproduziert. Daher kann davon ausgegangen werden, dass das Modell sowohl hydrologisch als auch in der Erzeugung von Energie und Trinkwasser prognosefähig ist.

8.3.3 Extremwerte

Für den Pegel Riefensbeek oberhalb der Sösetalsperre wird beispielhaft die Wiedergabe der Extremwerte in den beiden REMO-Läufen dargestellt. Hierzu vergleicht Tabelle 8-2 extreme Abflüsse unterschiedlicher Jährlichkeiten. Die auf Beobachtungsdaten basierenden Werte wurden vom Talsperrenbetreiber im Rahmen des Projektes KLIBIW für die Jahresreihe 1932-2010 ermittelt. Da der Talsperrenbetreiber die dreiparametrische logarithmische Normalverteilung mit Parameterschätzung nach der Maximum Likelihood Methode für den Pegel Riefensbeek am geeignetsten hält, wurden Verteilung und Methode für die Daten aus REMO übernommen. Dieser Auswertung liegt allerdings die kürzere Jahresreihe 1971 – 2000 zu Grunde.

Tabelle 8-2: *Extremwerte des Abflusses am Pegel Riefensbeek, Ermittlung auf der Grundlage von Beobachtungsdaten, REMO UBA und REMO BFG (LN3, MLM).*

	Beobachtung	REMO UBA	REMO BFG
HQ ₂ [m ³ /s]	11,10	14,48	12,53
HQ ₅	17,60	20,47	15,54
HQ ₁₀	22,60	24,58	17,44
HQ ₂₀	27,90	28,62	19,22
HQ ₅₀	35,40	34,00	21,47
HQ ₁₀₀	41,60	38,15	23,14

Während der UBA-Lauf die Extremwerte der Beobachtung gut reproduziert, unterschätzt der BFG-Lauf diese deutlich. Die Extreme des REMO UBA-Laufs liegen wesentlich näher an den aus der Beobachtung ermittelten, als die des BFG-Laufs. Obwohl die Niederschlagssummen des BFG-Laufs diejenigen des UBA-Laufs deutlich übersteigen, sind die Extreme der Abflüsse geringer, zumindest für die hier untersuchten Pegel. Im Bereich sehr seltener Ereignisse neigt auch der UBA-Lauf zu einer leichten Unterschätzung der Spitzenabflüsse. Damit eignet sich der REMO-UBA Lauf gut für eine Optimierung des Talsperrenbetriebs hinsichtlich des Hochwasserschutzes. Der BFG-Lauf kann hingegen für diese Fragestellung nicht verwendet werden.

8.4 Modellierung der Zukunft mit Stundenwerten aus REMO

8.4.1 Quartalsmittelwerte an den Zulaufpegeln

Ebenso wie für die Modellierung mit WETTREG werden die beobachteten Quartalsmittelwerte des Abflusses an den Zulaufpegeln des Talsperrensystems mit den Ergebnissen des Klimamodells für die Vergangenheit verglichen.

Die Ergebnisse für REMO sind in Abbildung 8-9 wiedergegeben und können direkt mit den Ergebnissen für WETTREG in Abbildung 8-3 verglichen werden. Für den meteorologischen Winter werden an allen Zuflusspegeln deutliche Zunahmen des Quartalsabflusses prognostiziert. Dies ist konsistent mit den Ergebnissen aus WETTREG. Die Ergebnisse der beiden Modelle weisen in dieselbe Richtung, die Modelle stützen sich gegenseitig. Das ist unter anderem deswegen wichtig, weil die Kalibrierung des Stundenmodells, das der REMO-Modellierung zu Grunde liegt, auf einer nur siebenjährigen Zeitreihe beruht. Sowohl die Ausgangslage als auch die Zunahme fallen aber im Vergleich der Pegel in den beiden Klimamodellen sehr unterschiedlich aus. Für die Vergangenheit gleicht der Quartalsabfluss aus WETTREG mindestens dem aus REMO, liegt aber in der Regel deutlich höher. Er übersteigt aber nur für den Pegel Erikabrücke an der Oder den beobachteten Wert. REMO trifft nur für den Pegel Rote Klippe an der Innerste die Beobachtung und ist ansonsten in beiden Läufen trockener als WETTREG.

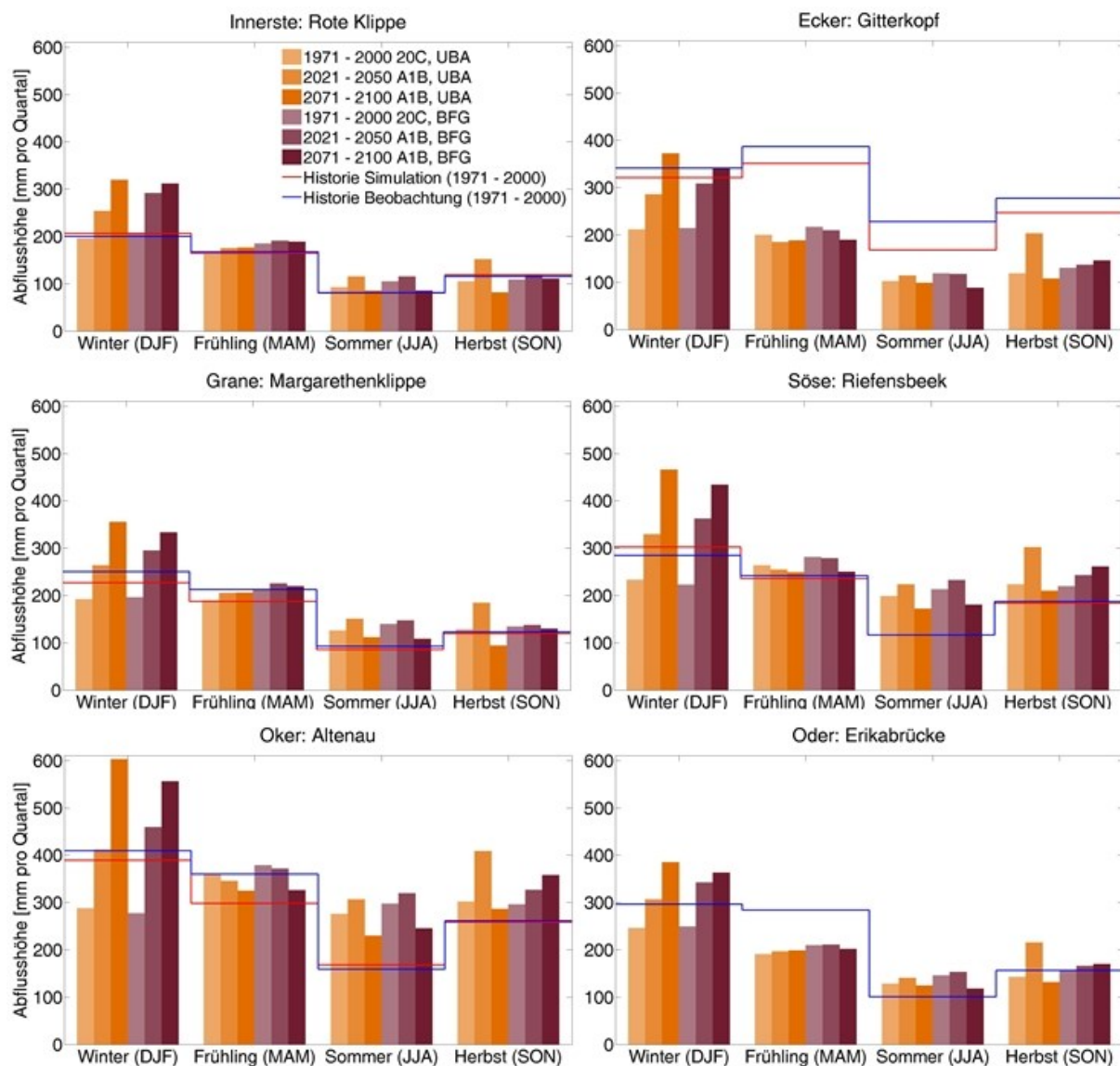


Abbildung 8-9: REMO UBA und BFG: Langfristige Entwicklung an den Zulaufpegeln des Untersuchungsgebiets in Quartalsmittelwerten.

Die zukünftige Zunahme des Quartalsabflusses im Winter wird von REMO in beiden Läufen deutlich stärker prognostiziert als von WETTREG. Das Extrem zeigt der Pegel Altenau an

der Oker, dessen Quartalsabfluss sich in der fernen Zukunft im UBA-Lauf von REMO von 300 auf 600 mm verdoppelt.

Für den Frühling sind die Prognosen an den Zulaufpegeln unterschiedlich. An Innerste, Grane und Oder wird in beiden REMO-Läufen eine leichte Zunahme der Abflüsse im Frühlingsquartal prognostiziert, in REMO UBA auf leicht geringerem Niveau als in REMO BFG. An Oker, Ecker und Söse findet sich ein anderes Bild: Hier wird eine Abnahme prognostiziert, die stärker ist als die Zunahme an den zuvor genannten Pegeln. WETTREG zeigt für diese Jahreszeit kaum Veränderungen in der Zukunft.

Im Sommer herrscht ein einheitliches Muster an allen Pegeln und in beiden REMO-Läufen vor. Einer Zunahme in der nahen Zukunft folgt eine Abnahme in der fernen Zukunft, die unter das Ausgangsniveau führt. Diese Beschreibung passt auch gut auf die WETTREG-basierten Prognosen und kann im Zusammenhang mit der Temperaturentwicklung interpretiert werden. Wie in Tabelle 3-1 auf Seite 51 dargestellt, nimmt die Temperatur – und damit die Verdunstung – in der nahen Zukunft zunächst ab, um in der fernen Zukunft zuzunehmen.

Im Herbst schließlich widersprechen sich die Aussagen der beiden REMO-Läufe teilweise. Während der UBA-Lauf für dieses Quartal das Sommermuster der Zunahme in der nahen und Abnahme in der fernen Zukunft auf deutlich höherem Niveau wiederholt, zeigt der BFG-Lauf ein uneinheitliches Bild: An Innerste und Grane entspricht die Entwicklung dem UBA-Lauf, wenn auch Zu- und Abnahmen sehr gering ausfallen. Oker, Ecker, Söse und Oder zeigen hingegen einen Anstieg sowohl für die nahe als auch für die ferne Zukunft, wobei dieser für Oker und Söse recht stark ausfällt. In WETTREG sind Herbst kaum Veränderungen für die nahe und leichte Abnahmen für die ferne Zukunft zu erkennen.

Qualitativ gleichen die Ergebnisse an den Zulaufpegeln der Talsperren den prozentualen Veränderungen des Niederschlages aus Tabelle 3-2.

8.4.2 Extremwerte an den Zulaufpegeln

Für das Hochwassermanagement ist eine Zunahme nasserer Winter eine wichtige Information, da dies den für den Winter vorgehaltenen größeren Hochwasserschutzraum vermindert. Die wichtigere Information ist jedoch die Entwicklung extremer Ereignisse, die Abbildung 8-10 für REMO beschreibt. Sie kann mit Abbildung 8-5 für WETTREG verglichen werden.

Die Darstellungen basieren auf einer hochwasserstatistischen Auswertung der Jahresmaxima aus der Berechnung mit den Klimamodelldaten. Mit der Momentenmethode wurden Parameter für die Verteilung nach Gumbel geschätzt. Dies ist ein sehr robustes Verfahren der Extremwertanalyse.

Der Vergleich der beiden Abbildungen macht deutlich, dass die Klimamodelle hier in unterschiedliche Richtung weisen. Während WETTREG eine Abnahme prognostiziert, zeigt REMO beinahe einheitlich für alle Pegel eine deutliche Zunahme an.

Stundenwerte sind für die Hochwassercharakteristik kleiner Einzugsgebiete aber aussagekräftiger als Tageswerte, daher haben die Ergebnisse von REMO ein höheres Gewicht.

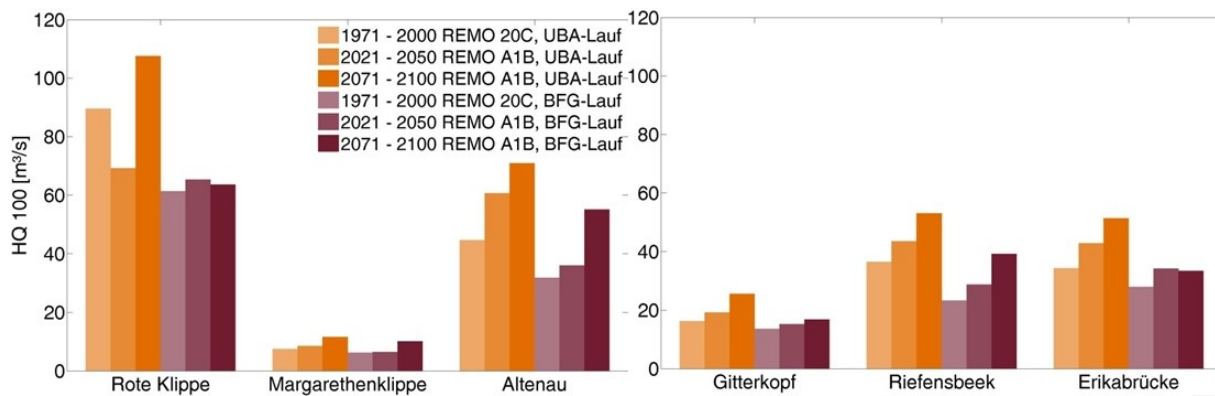


Abbildung 8-10: Entwicklung des HQ_{100} an den Zulaufpegeln des Talsperrensystems für REMO UBA und REMO BFG.

Sowohl UBA- als auch BFG-Lauf zeigen für die nahe und ferne Zukunft an den meisten Pegeln eine Zunahme des Abflusses für das HQ_{100} an, wobei diese für den UBA-Lauf in der Regel größer ist als für den BFG-Lauf. Die Hochwasserbelastung der Talsperren steigt. Eine Sonderstellung nimmt der Pegel Rote Klippe der Innerste ein, da hier sich auch die Ergebnisse der beiden REMO-Läufe widersprechen. Während REMO UBA eine deutliche Abnahme in der nahen Zukunft und eine noch größere Zunahme in der fernen Zukunft aufweist, zeigt REMO BFG eine genau gegenläufige Entwicklung auf sehr niedrigem Niveau.

8.5 Diskussion

Die regionalen Klimamodelle WETTREG und REMO stützen die Prognose eines nasseren Winters, gefolgt von einem trockeneren Verlauf im Rest des Jahres, zumindest für die ferne Zukunft. REMO BFG deutet für manche Pegel einen nasseren Herbst an. Das allgemeine Bild eines deutlich nasseren Winters und etwas trockeneren Sommers, wie es Meon et al. (2012) für das Einzugsgebiet der Aller zeichnen, passt also auch auf den Harz. Bergström et al. (2001) beobachten ähnliche Veränderung der Abflusscharakteristik in Skandinavien.

Die in Brocken und Bruchberg gegliederte Orografie des Hochharzes erscheint in den regionalen Klimamodellen als nur eine Erhebung, deren Gipfel etwas südwestlich des Bruchbergs aufragt. In dessen Luv erzeugen die Klimamodelle hohe Niederschläge. Das führt dazu, dass die eigentlich höchste Erhebung des Harzes in den Windschatten gerät und infolge dessen weit geringere Niederschläge als in der Realität erhält. Vom Brocken oder aus Staulagen vor dem Brocken gespeiste Talsperren erhalten aus den Klimamodellen zu wenig Niederschlag und können für eine quantitative Berechnung nicht hinreichend genau abgebildet werden. Dies betrifft Ecker- und Odertalsperre. Da die Granetalsperre als Zwischenspeicher für das zentrale Kraftwerk bezüglich ihres Einzugsgebietes mit einem Ausbaugrad von drei übergroß ist, weist sie keine eigene Hochwassergefährdung auf. Damit bleiben für die Optimierung Innerste-, Oker- und Sösetalsperre.

Nur der UBA-Lauf von REMO reproduziert die in der Vergangenheit beobachtete Extremwertverteilung an den Zulaufpegeln der Talsperren. Die Optimierung hinsichtlich des Hochwasserschutzes kann sich daher nur auf diesen einen Lauf stützen. Die Angabe einer Bandbreite bzw. Unsicherheit aus den Klimamodellen ist daher nicht möglich. Sowohl UBA- als auch BFG-Lauf prognostizieren jedoch eine deutliche Zunahme der Hochwasserbelastung.

9 Optimierung des Talsperrenbetriebs

Für die Optimierung des Talsperrenbetriebs bezüglich der Hochwasserbelastung ist eine Entscheidung über die zu verwendenden Daten und über das zu erreichende Ziel zu treffen.

Die Verwendung von WETTREG ist nicht ratsam: für eine belastbare Aussage müssen 20 Realisationen modelliert und ausgewertet werden. Da Optimierungsalgorithmen zahlreiche Rechenläufe benötigen, ist dies eine wenig effiziente Option. Die Abbildung der Unsicherheit durch zahlreiche Realisationen ist sicherlich für eine Entscheidungsfindung sinnvoll. Jedoch steht im vorliegenden Kontext diese Unsicherheitsabschätzung einer effizienten Optimierung im Weg. Ein statistisches Klimamodell, das drei Realisationen liefert, wobei eine die mittleren Verhältnisse, die beiden anderen eine untere und obere Hüllkurve darstellen, wäre hingegen in einer Optimierung sinnvoll einsetzbar. Dies aber nur unter der Voraussetzung einer realistischen Abbildung der zukünftigen Entwicklung der Extremwerte, was im Untersuchungsgebiet für WETTREG 2006 nicht gegeben ist.

Daher bleibt als zweite Option die Verwendung von REMO. Hier ergab die Modellierung der Vergangenheit hinsichtlich der Abbildung der Systemcharakteristik eine Überlegenheit des UBA-Laufs gegenüber dem BFG-Lauf. Die Mehrheit der Pegel zeigt eine Verschärfung der Hochwassersituation sowohl in der nahen als auch in der fernen Zukunft an. Nur der UBA-Lauf von REMO reproduziert die beobachtete Extremwertverteilung an den Zulaufpegeln der Talsperren für die Vergangenheit. Daher verbleibt nur er für die Optimierung. Um die Belastbarkeit des Talsperrensystems bezüglich des Klimawandels zu erproben, empfiehlt sich die Verwendung eines extremen Szenarios, wie es der REMO UBA-Lauf für die ferne Zukunft zeigt. Mit der Anwendung der optimierten Betriebsregel auf den weniger extremen BFG-Lauf kann ihre Robustheit evaluiert werden.

Für die Optimierung wurde als Ziel gewählt, durch eine veränderte Bewirtschaftung der Talsperren die Hochwasserbelastung für die Unterlieger auf gegenwärtigem Niveau zu halten. Die Spitzenabgabe der Zukunft soll bei größerer Hochwasserbelastung der Talsperre gleich der Spitzenabgabe der Vergangenheit sein. Dieses Ziel wird im Weiteren ‚konstante Gefährdung‘ genannt, es ist nur eines von vielen möglichen Optimierungszielen. Weiter interessiert die Fragestellung, wie sich die veränderte Bewirtschaftung auf die restliche Zeit des Jahres auswirkt.

Wie die das letzte Kapitel abschließende Diskussion ergab, sind Innerste-, Oker- und Sösetalsperre für die Optimierung geeignet. Dies ist eine interessante Auswahl, da wegen des sehr kleinen Ausbaugrades der Innerstetalsperre ein starker Einfluss extremerer Hochwasserereignisse auf dieselbe zu erwarten ist. Bei der Okertalsperre stand der Hochwasserschutz stets im Vordergrund. Die Sösetalsperre oberhalb von Osterode mit Wasserwerk und komplexer Energieerzeugung eignet sich besonders für eine integrierte Betrachtung der ökonomischen Auswirkungen.

9.1 Optimierung bezüglich des Hochwasserschutzes

Wie in Kapitel 5.2.2 ausführlich diskutiert wurde, ist die Verwendung von genetischen Algorithmen in der Optimierung des Talsperrenbetriebs eine sehr erfolgreich angewandte Strategie. Die Abbildung 9-1 zeigt die daraus abgeleitete Vorgehensweise zur Optimierung des Talsperrenbetriebs mit einem Wasserhaushaltsmodell, einem Metamodell und dem zur Optimierung verwendeten genetischen Algorithmus.

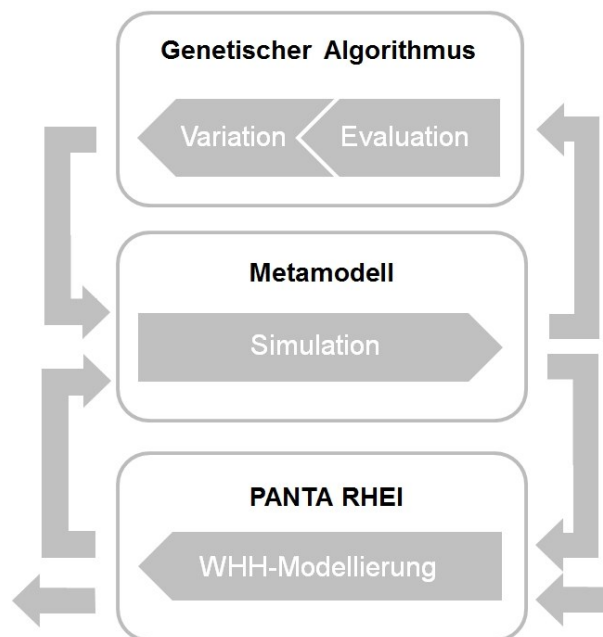


Abbildung 9-1: Ansatz zur Optimierung des Talsperrenbetriebs bezüglich Hochwasserschutz.

Für die Anwendung des als Matlab Toolbox verfügbaren genetischen Algorithmus nach Conn et al. (1997) wurde zunächst vom Autor ein einfaches Metamodell geschrieben. Dies war notwendig, da das Metamodell im Rahmen der Optimierung sehr häufig ausgeführt werden musste. Es berechnet Inhalt und Abgabe mittels der Speichergleichung (Gleichung 12) als den Masseerhalt sicherstellender Randbedingung aus Gesamtzufluss zur Talsperre und den Betriebsregeln von 1989. Der genetische Algorithmus variiert die Betriebsregel und evaluiert das Ergebnis durch Ausführen des Metamodells und Auswertung der Zielfunktion. Die Zielfunktion ist der RMSE (Gleichung 4) aus größter Abgabe der Zukunftsprojektion und größter Abgabe der Vergangenheit. Ein RMSE von null zeigt das Erreichen des gewählten Optimierungsziels, der konstanten Gefährdung, an.

Abbildung 9-2 vergleicht das Ergebnis des Metamodells (rot) mit der Berechnung aus PANTA RHEI (blau) für die Vergangenheit und die Betriebsregeln von 1989. Das Ergebnis des Metamodells stimmt mit der Berechnung aus PANTA RHEI gut überein. Wird die magentafarbene Linie überschritten, springt die Hochwasserentlastung an. Die cyanfarbene Linie bezeichnet den minimalen Speicherinhalt bei dessen Unterschreitung das Metamodell eine konstante Minimalabgabe ansetzt.

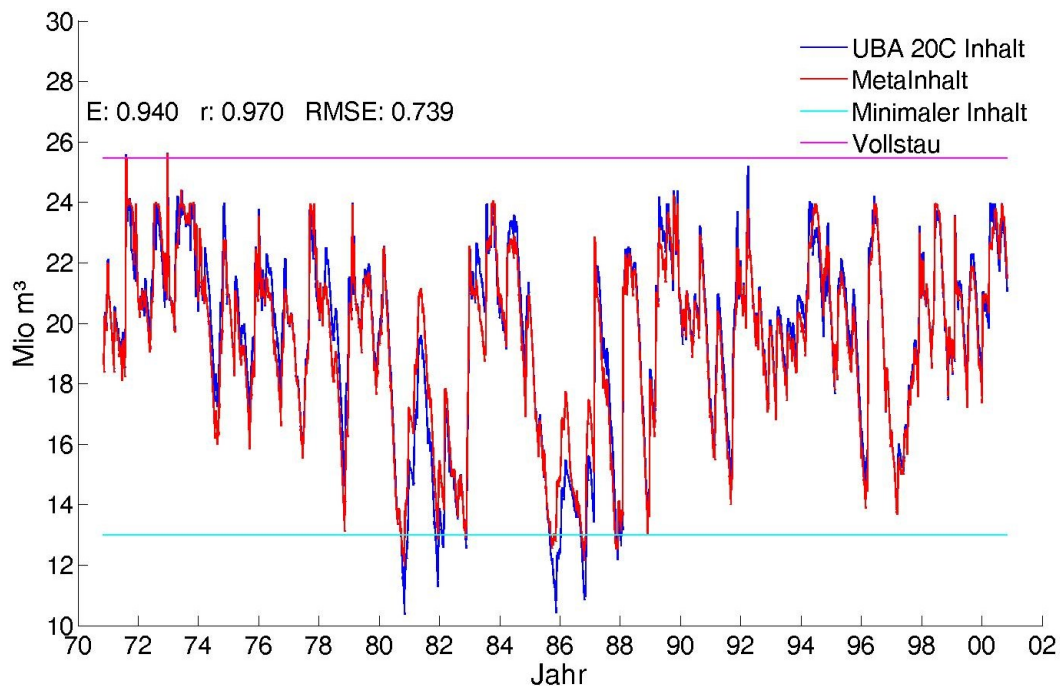


Abbildung 9-2: Mit dem Metamodell berechnete Inhalte der Sösetalsperre im Vergleich mit der Berechnung aus PANTA RHEI.

Abbildung 9-3 zeigt die mit dem Metamodell berechneten Abgaben. Die Kreise bezeichnen den höchsten jährlichen Stundenabfluss, nicht etwa Tagesmittelwerte. Die im linken Teil der Abbildung gezeigten sehr hohen Gütemaße beziehen sich auf die jährlichen Maxima. Im September 1973 ist kein Hochwasser mit einem Scheitelabfluss von rund 24 m³/s aufgetreten. Das Klimamodell reproduziert nicht die Vergangenheit, sondern klimatische Verhältnisse der Vergangenheit. Diese hätten einen solchen Hochwasserscheitel erlaubt.

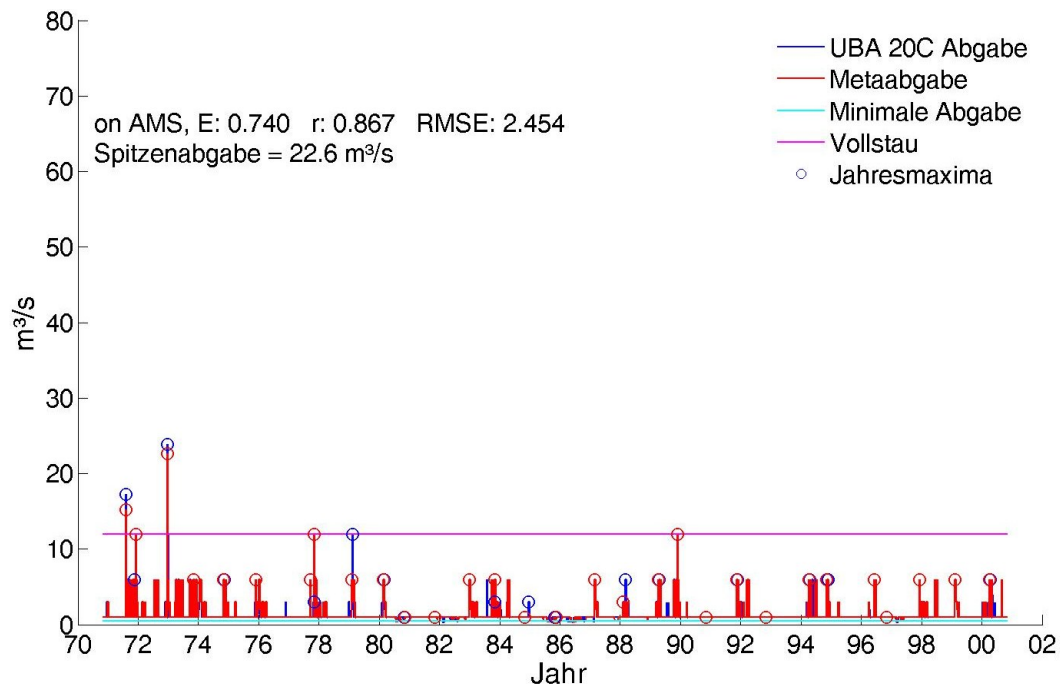


Abbildung 9-3: Mit dem Metamodell berechnete Abgaben der Sösetalsperre im Vergleich mit der Berechnung aus PANTA RHEI.

Der Vergleich mit Abbildung 7-27 zeigt, dass der UBA-Lauf für den Zeitraum 1971-2000 nicht wesentlich höhere oder häufigere Hochwasserscheitel produziert als die der Kalibrierung zu Grunde liegenden Daten. Das Metamodell reproduziert die mit PANTA RHEI modellierten Spitzenabflüsse gut, allerdings nicht ganz so gut wie die Speicherinhalte. Es ist damit geeignet, die Vergangenheit des Klimamodells nachzubilden. Im nächsten Schritt folgt darum die Anwendung für die ferne Zukunftsprojektion. Abbildung 9-4 zeigt die dafür ermittelten Speicherinhalte und Abbildung 9-5 die Abgaben.

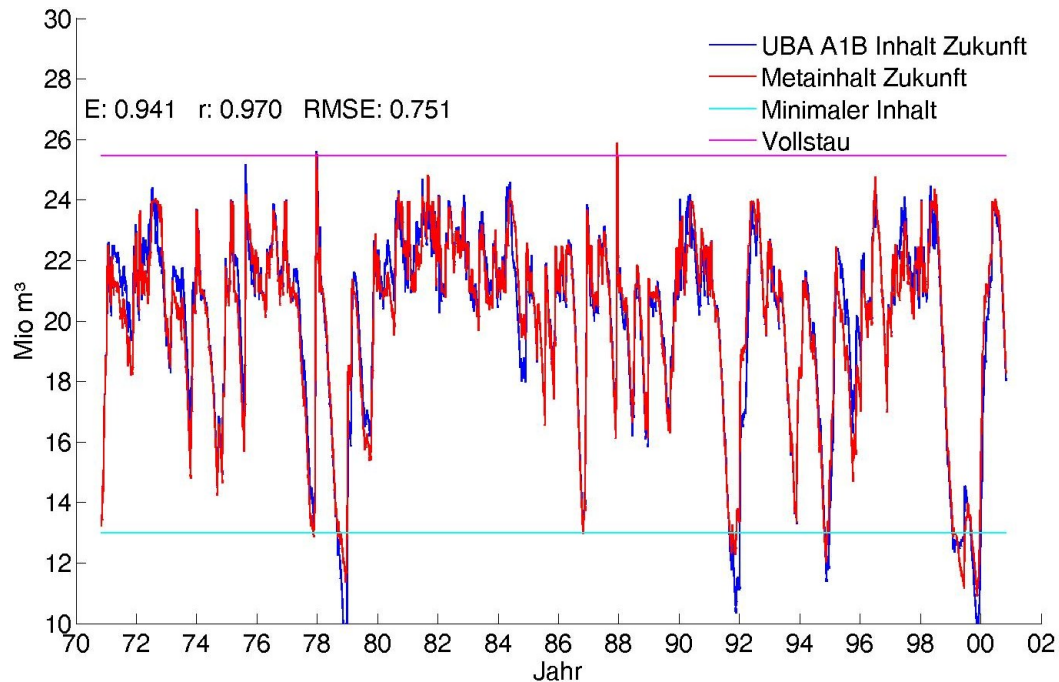


Abbildung 9-4: Mit dem Metamodell berechnete Inhalte der Sösetalsperre für die ferne Zukunft 2071–2100 im Vergleich mit der Berechnung aus PANTA RHEI.

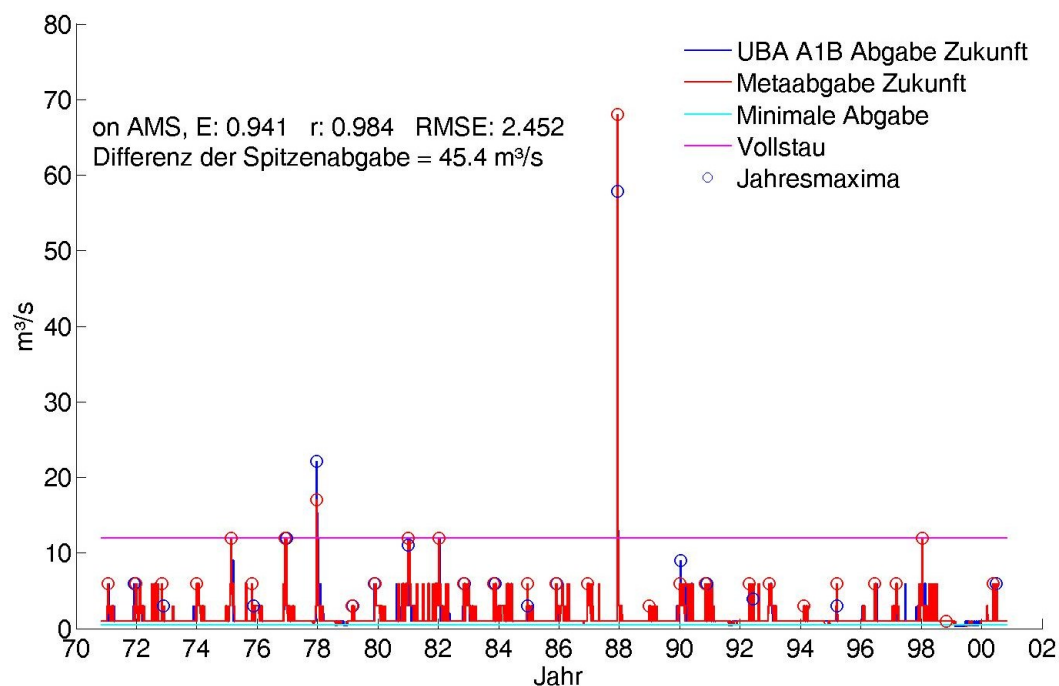


Abbildung 9-5: Mit dem Metamodell berechnete Abgaben der Sösetalsperre für die ferne Zukunft 2071–2100 im Vergleich mit der Berechnung aus PANTA RHEI.

Ein Blick auf die Speicherinhalte zeigt im Vergleich mit Abbildung 9-2 eine an Extremen reichere Zukunft. Im Jahr 2099 erzeugt die Zukunftsprojektion des Klimamodells für eine längere Zeit einen sehr niedrigen Speicherinhalt.

Extreme Hochwasserereignisse treten auch in der Zukunftsprojektion im Winter auf. Die Hochwasserentlastung wird nicht häufiger, aber teilweise deutlich stärker beaufschlagt als in der Vergangenheit. Im Dezember 2078 und im Dezember 2088 erzeugt die Zukunftsprojektion große Entlastungsereignisse. In der PANTA RHEI-Berechnung (blau in Abbildung 9-5) übertrifft das fiktive Ereignis im Dezember 2088 mit einem Spitzenabfluss von $57,83 \text{ m}^3/\text{s}$ den höchsten Scheitel der Vergangenheit (blau in Abbildung 9-3) von $23,84 \text{ m}^3/\text{s}$ um $25 \text{ m}^3/\text{s}$. Das Metamodell berechnet eine Spitzenabgabe von $68,02 \text{ m}^3/\text{s}$ (rot in Abbildung 9-5) und liegt damit um $45,4 \text{ m}^3/\text{s}$ über der größten Abgabe der Vergangenheit von $22,62 \text{ m}^3/\text{s}$ (rot in Abbildung 9-3). Das Metamodell überschätzt aufgrund vereinfachender Annahmen die zukünftige Spitzenabgabe in diesem Beispiel um rund $10 \text{ m}^3/\text{s}$. Die daraus resultierenden Auswirkungen auf das Ergebnis werden im folgenden Abschnitt diskutiert.

Da die großen Hochwässer der Zukunftsprojektion Winterereignisse - möglicherweise Taufluten - sind, reicht eine Änderung der Betriebsregel im Winter aus. Sie muss darauf abzielen, den gewöhnlichen Hochwasserschutzraum im Winter zu vergrößern, um Platz für die Füllen großer Hochwasserscheitel zu schaffen. Bei einem gegebenen Speicherinhalt ist die Abgabe in den Monaten Dezember, Januar und Februar also gegenüber der Vergangenheit zu erhöhen.

Daher erzeugte der für die Optimierung verwendete genetische Algorithmus eine zufällige Anfangspopulation von 20 Individuen, die jeweils einen - für jedes Individuum unterschiedlichen - Faktor zur Erhöhung der Abgabe aus allen Lamellen in den Monaten Dezember bis Februar vorschlugen. Es handelte sich also um eine einfache Formulierung mit nur einer Entscheidungsvariablen. Kompliziertere Formulierungen sind denkbar, die für jede Lamelle und jeden Monat des Winters eine unterschiedliche Erhöhung vorschlagen.

Jedes Individuum wurde bezüglich der Minimierung der Zielfunktion evaluiert und konnte seinen Faktor zur Erhöhung der Abgabe entsprechend seines Erfolges und den in Abschnitt 5.2.2 beschriebenen Fortpflanzungsregeln in die Folgegeneration weitergeben. Nach 52 Generationen und einer Rechenzeit von rund 25 Minuten verbesserte sich der RMSE als Wert der Zielfunktion nicht weiter, ein Optimum war erreicht. Wie Abbildung 9-6 zeigt, treten Abgaben über $60 \text{ m}^3/\text{s}$ nicht mehr auf, die maximalen Abgaben betragen nach der Optimierung wie gefordert rund $23 \text{ m}^3/\text{s}$, der RMSE beträgt 93 l/s . Allerdings tritt eine Abgabe in dieser Größenordnung nun drei Mal in der fernen Zukunftsprojektion auf. Der Ausbaugrad der Söse erfordert im Metamodell eine Erhöhung der Winterabgaben um den Faktor 3,75 bzw. 275%.

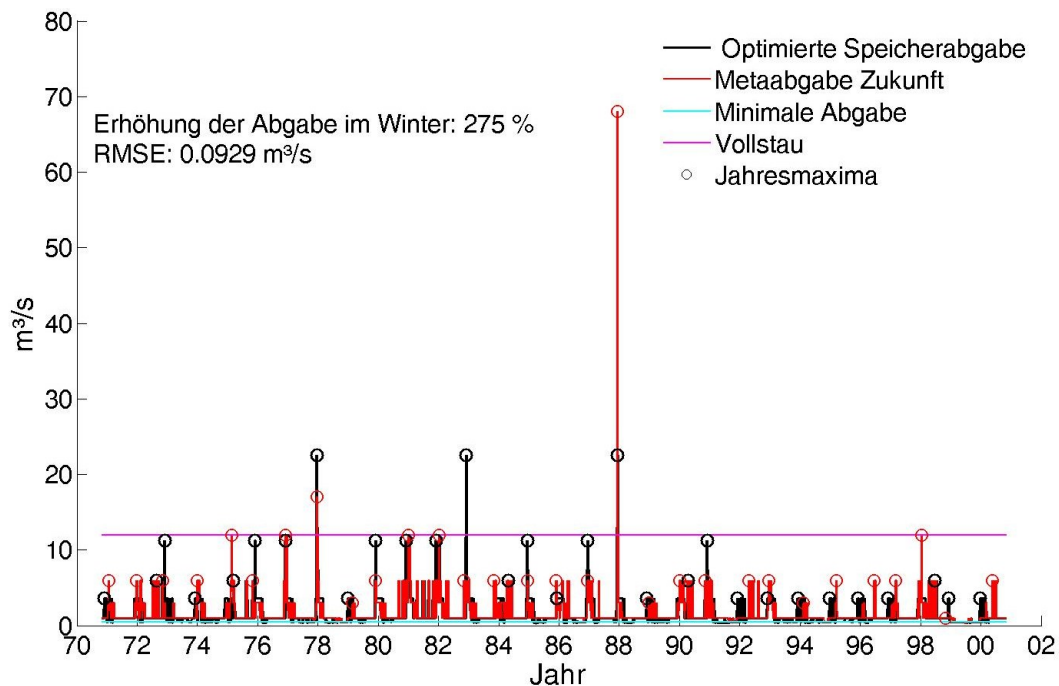


Abbildung 9-6: Optimierte Abgaben der Sösetalsperre für die ferne Zukunft im Vergleich mit der Ausgangssituation.

Die in Abbildung 9-7 gezeigten Auswirkungen dieser bezüglich des Hochwasserschutzes optimierten Betriebsregel auf den Speicherinhalt erscheinen drastisch. Mit ihr würde scheinbar die Sösetalsperre im Metamodell in vielen Jahren den minimalen Speicherinhalt erreichen.

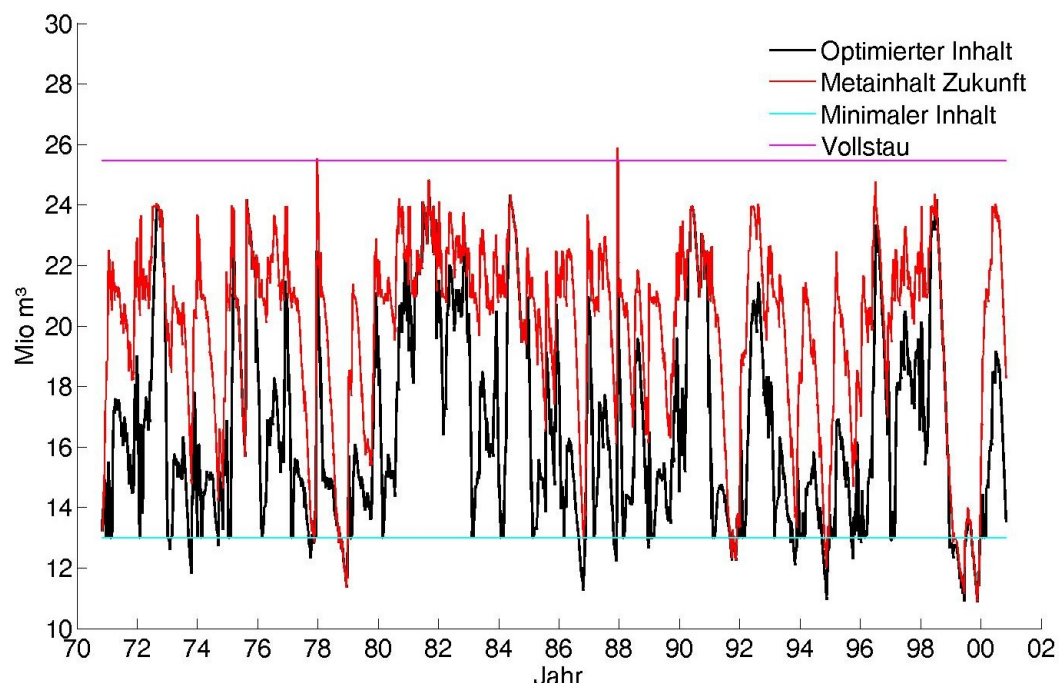


Abbildung 9-7: Auswirkung der optimierten Abgaben der Sösetalsperre auf den Speicherinhalt für die ferne Zukunft im Vergleich mit der Ausgangssituation.

Für die Innerstetalsperre mit einem Ausbaugrad von 0,33 fiel die Erhöhung mit einem Faktor von 8,4 erwartungsgemäß am größten aus. An zweiter Stelle folgte die Sösetalsperre mit einem Faktor von 3,75, obwohl ihr Ausbaugrad mit 0,65 sogar etwas größer als der der O-

kertalsperre mit 0,63 ist. Der deutlich größere Stauraum der Okertalsperre und ihr auf den Hochwasserschutz zugeschnittener Betriebsplan macht hier die geringste Erhöhung der Winterabgaben um einen Faktor von 1,8 erforderlich. Die grafischen Darstellungen für diese Talsperren befinden sich in Anhang 2. Die erforderliche Erhöhung der Abgaben in den Wintermonaten Dezember, Januar und Februar ist vom Ausbaugrad und dem derzeit verwendeten Betriebsplan abhängig.

9.2 Evaluierung der Optimierung im Wasserhaushaltsmodell

An den drei untersuchten Talsperren wird für die ferne Zukunftsprojektion des REMO-UBA-Laufs eine wesentlich höhere Spitzenabgabe als in der Vergangenheit prognostiziert. Das stellt die Tabelle 9-1 in der zweiten und dritten Spalte für das Wasserhaushaltsmodell und in der vierten und fünften Spalte für das Metamodell dar. Letzteres enthält gegenüber dem Wasserhaushaltsmodell vereinfachende Annahmen in der Talsperrensteuerung was unter anderem zur Folge hat, dass die zukünftigen Spitzenabgaben aus der Wasserhaushaltsberechnung für Innerste- und Sösetalsperre überschätzt, für die Okertalsperre hingegen unterschätzt werden. Das zeigt Tabelle 9-1 in der dritten und fünften Spalte. Daher muss die im Optimierungsmodell gefundene Betriebsregel im Wasserhaushaltsmodell überprüft werden.

Tabelle 9-1: Eingangswerte für die Optimierung und Ergebnisse des Metamodells.

Talsperre	PANTA RHEI		Metamodell				
	UBA 20C	UBA A1B	UBA 20C	UBA A1B 2071-2100			
	1971-2000	2071-2100	1971-2000	Erhöhung			
	Max. Scheitel [m³/s]		Max. Scheitel [m³/s]	der Abgabe		RMSE	Red. Scheitel
Innerste	81,70	105,59	83,82	111,57	8,38	0,025	83,80
Oker	51,33	97,69	49,06	84,37	1,78	0,253	49,31
Söse	23,84	57,83	22,62	68,02	3,75	0,093	22,52

Das Metamodell schlägt als optimale Variante eine Erhöhung der Winterabgaben um Faktoren zwischen 1,8 (Oker) und 8,4 (Innerste) vor (sechste Spalte). Die Scheitelreduktion gelingt sehr gut, wie der RMSE als Zielfunktion in der siebten und der reduzierte Scheitel in der achten Spalte zeigt. Das Optimierungsziel der konstanten Spitzenabgabe scheint erreicht.

In einer Evaluation der optimierten Betriebsregel im Wasserhaushaltsmodell führen die vereinfachenden Annahmen des Metamodells zu einer Überkompensation der Scheitelreduktion. Dies wird anhand von Tabelle 9-2 diskutiert. Für ihre Ermittlung wurde die vorgeschlagene Abgabeänderung in PANTA RHEI in die Betriebspläne des Westharzmodells implementiert und neu berechnet. Das Ergebnis zeigt die zweite Spalte der Tabelle. Die Spitzenabgaben fallen zu gering bzw. die Reduktion des Scheitels zu stark aus. Statt einer erlaubten Spitzenabgabe von 51 m³/s errechnet PANTA RHEI beispielsweise für die Okertalsperre mit dem Optimierungsvorschlag des Metamodells eine deutlich geringere Spitzenabgabe von 42,3 m³/s.

Tabelle 9-2: *Evaluierung der Optimierungsergebnisse aus dem Metamodell in PANTA RHEI für das ferne Zukunftsszenario.*

Talsperre	Evaluierung	Anpassung	Erhöhung Abgabe	Änderung
	Scheitel [m³/s]		[-]	%
Innerste	70,00	83,78	5,10	-39%
Oker	42,28	51,06	1,31	-26%
Söse	20,00	23,56	2,13	-43%

Durch strukturiertes Ausprobieren wurde in 10 Simulationsläufen der Faktor der Abgabehöherung reduziert. Die Abbildung 9-8 vergleicht die vom Metamodell vorgeschlagene Erhöhung der Abgabe aus Tabelle 9-1 Spalte 6 mit der reduzierten Erhöhung der Abgabe aus Tabelle 9-2, Spalte 4.

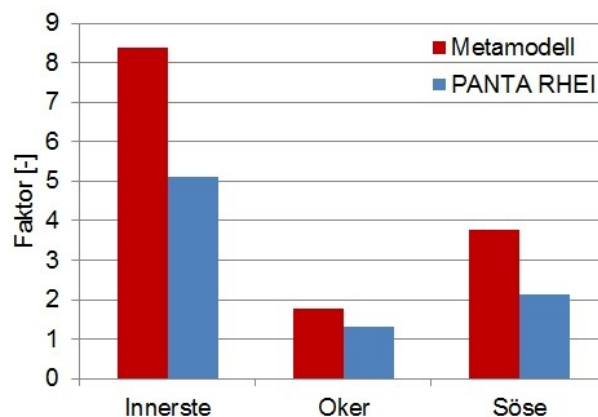


Abbildung 9-8: *Erhöhung der Abgabe in den Wintermonaten. Rot: Ergebnis des Metamodells, blau: reduzierte Erhöhung durch Evaluation des Optimierungsergebnisses in PANTA RHEI*

Die Erhöhung der Abgaben ist abhängig vom Ausbaugrad der Talsperre (Tabelle 2-3 auf Seite 25) und vom derzeitigen Betriebsplan. Die Innerstetalsperre mit einem Ausbaugrad von 0,33 ist in Verhältnis zu ihrem Einzugsgebiet klein und damit sehr empfindlich gegen Hochwasser. Sie benötigt eine starke Erhöhung. Oker- und Sösetalsperre verfügen über einen vergleichbaren Ausbaugrad (0,63 und 0,65), da der Betriebsplan der Okertalsperre Hochwasser auch heute schon besonders berücksichtigt, kann bei ihr die Erhöhung der Abgaben am geringsten ausfallen. Das Ergebnis der Optimierung ist daher plausibel.

Eine Reduktion um 26 (Oker) bis 43% (Söse) führte zu einer sehr guten Einhaltung der Scheitelabgaben der Vergangenheit mit den Eingangsdaten für die ferne Zukunftsprojektion. Dies zeigt Abbildung 9-9 für die Pegel unterhalb der Talsperren. Über der Berechnung mit den unveränderten Betriebsregeln von 1989 (blau) ist das mit der optimierten Betriebsregel errechnete Ergebnis in orange dargestellt.

Die Abbildung 9-10 zeigt, dass die Auswirkungen auf die Talsperreninhalte weit weniger drastisch sind als vom Metamodell prognostiziert. Selten, und erst ab 2090 zunehmend, sinken in der Zukunftsprojektion die jährlichen minimalen Speicherinhalte durch die Optimierung bezüglich des Hochwasserschutzes tiefer als bei Verwendung der Betriebsregeln von 1989.

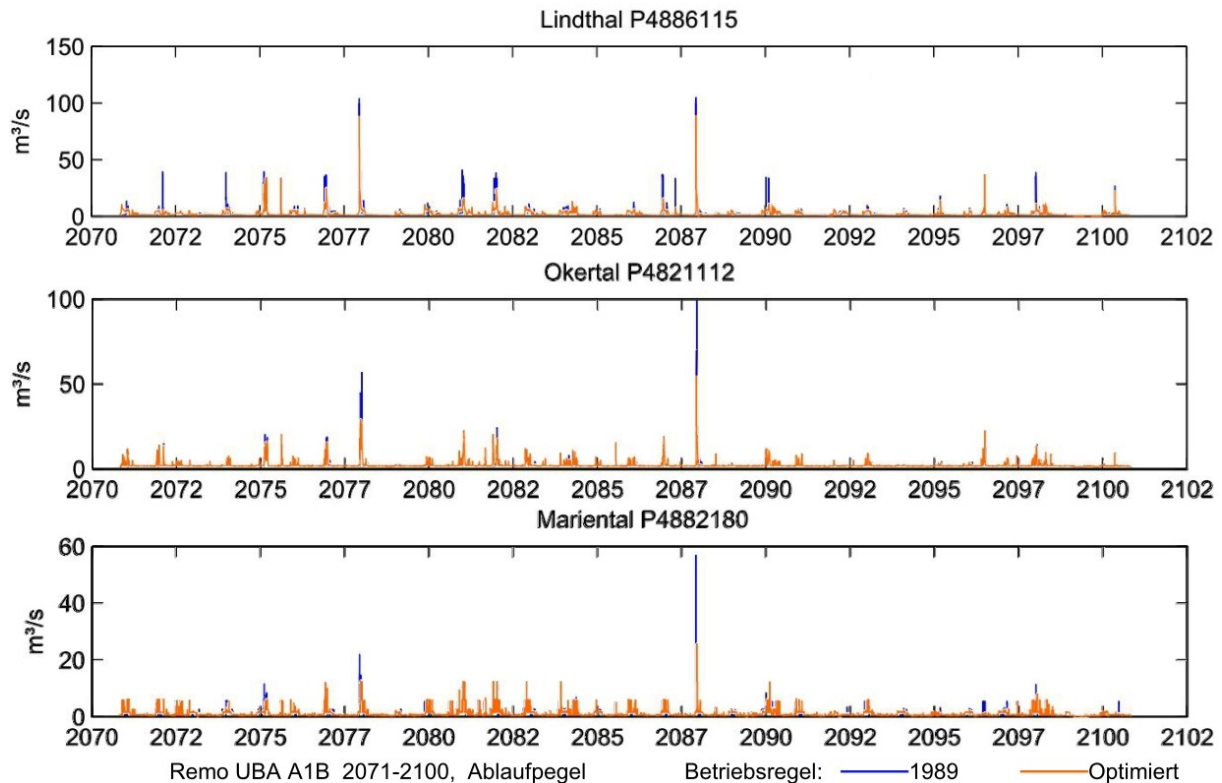


Abbildung 9-9: REMO UBA 2071-2100. Maximalscheitel an den Ablaufpegeln der optimierten Talsperren für die ferne Zukunft, basierend auf den Betriebsregeln von 1989 (blau) und den optimierten Betriebsregeln (orange).

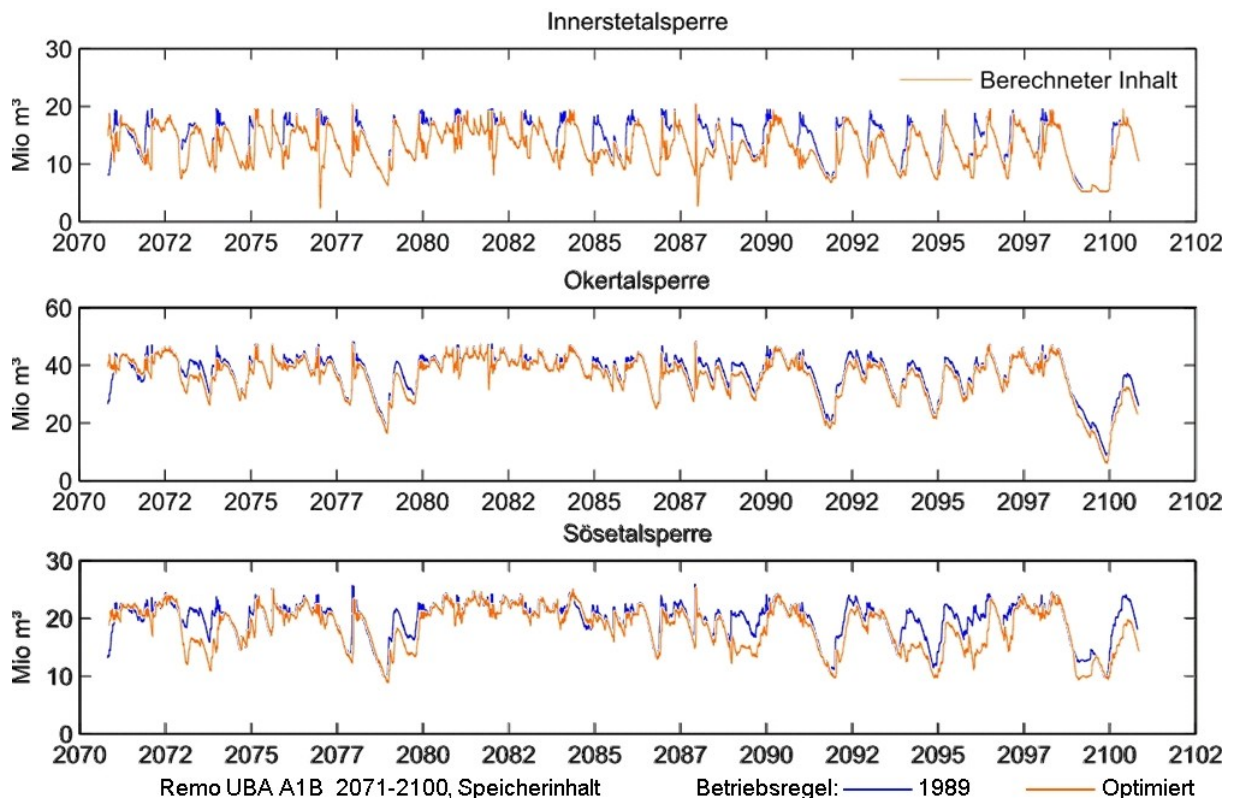


Abbildung 9-10: REMO UBA 2071-2100. Speicherinhalte der optimierten Talsperren für die ferne Zukunft, basierend auf den Betriebsregeln von 1989 (blau) und den optimierten Betriebsregeln (orange).

Die Abbildung 9-11 zeigt die Auswirkungen, die die für den REMO UBA-Lauf optimierte Betriebsregel hat, wenn zum Antrieb des Modells der REMO BFG-Lauf verwendet wird.

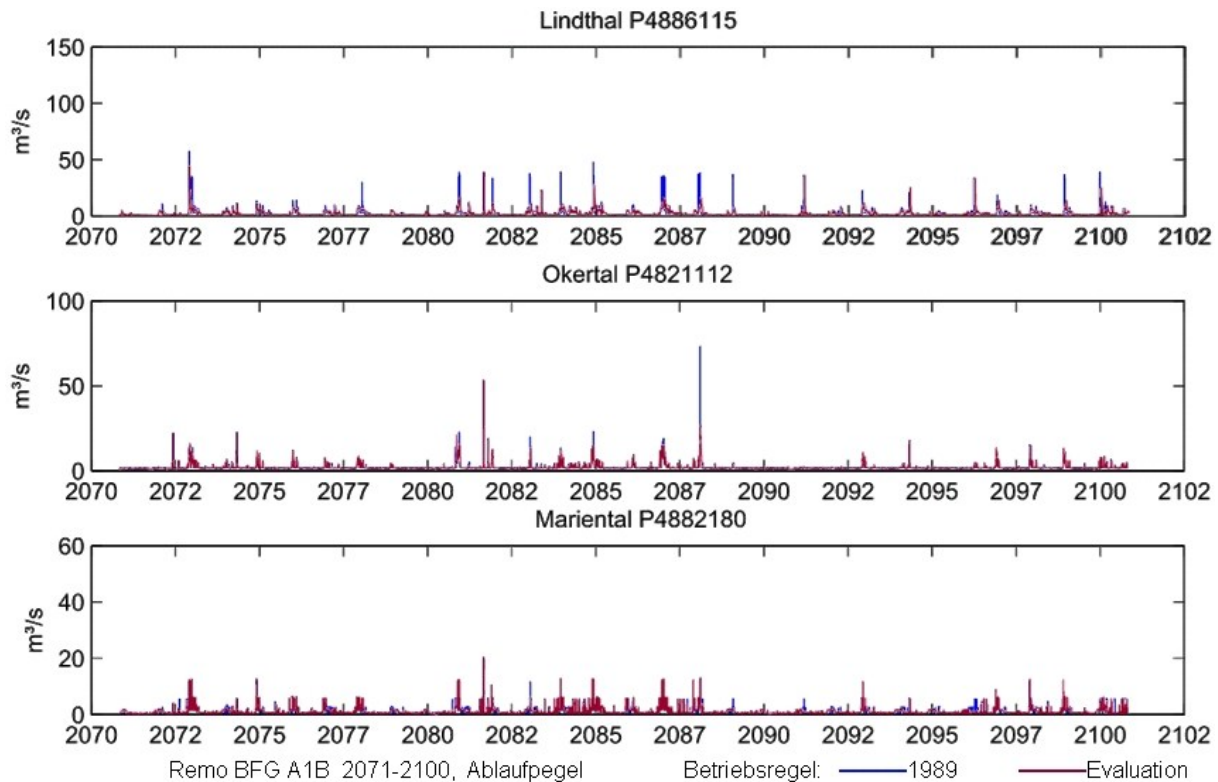


Abbildung 9-11: REMO BFG. Maximalscheitel an den Ablaufpegeln der optimierten Talsperren für die ferne Zukunft, basierend auf den Betriebsregeln von 1989 (blau) und den optimierten Betriebsregeln (weinrot).

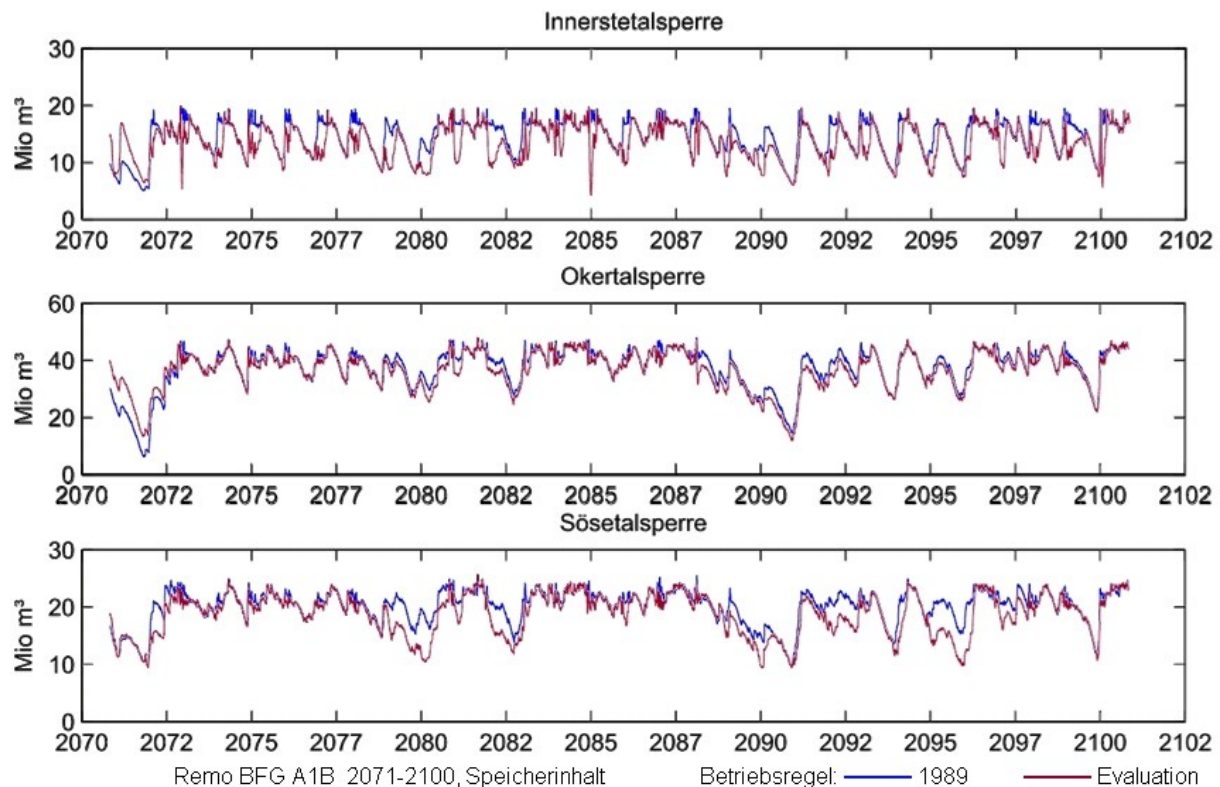


Abbildung 9-12: REMO BFG. Speicherinhalte der optimierten Talsperren für die ferne Zukunft, basierend auf den Betriebsregeln von 1989 (blau) und den optimierten Betriebsregeln (weinrot).

Konsistent mit den HQ_{100} -Scheiteln aus Abbildung 8-10 sind die Abflussspitzen für das blaue Vergangenheitsszenario des REMO BFG-Laufs deutlich geringer. Auch diese Abflussspitzen werden durch die neue Betriebsregel vermindert. Die Abbildung 9-12 zeigt anhand der Talsperreninhalte, dass die größeren Niederschlagsmengen des REMO BGF-Laufs sich positiv auf die kleinen Speicherinhalte der fernen Zukunft auswirken. Letztere liegen im REMO BFG-Lauf über denen des REMO UBA-Laufs. Obwohl die neue Betriebsregel für ein Zukunftsszenario mit höheren Extremen optimiert ist, eignet sie sich auch für gemäßigte Szenarien, sie ist robust.

9.3 Diskussion

Um die grundsätzliche Machbarkeit des Optimierungsansatzes zu demonstrieren, wurde aus dem einzigen für eine Optimierung geeigneten Zukunftsszenario, dem UBA-Lauf des dynamischen Regionalmodells REMO, die größte Änderung gegenüber der Gegenwart ausgewählt. Dies ist eine extreme Zunahme von Spitzenabflüssen in zwei Wintern der Zeitreihe 2071-2100.

Die Optimierung der Betriebsregel mit dem Ziel einer konstanten Spitzenabgabe bei erhöhter Hochwasserbelastung gelang grundsätzlich. Die erforderliche Erhöhung der Abgaben in den Wintermonaten ist vom Ausbaugrad und dem derzeitigen Betriebsplan abhängig. Daher ist das Ergebnis der Optimierung plausibel.

Dieses Kapitel stellt die Optimierungsmöglichkeiten prinzipiell dar. Es konnte gezeigt werden, dass die vorgeschlagene Methodik zu bewertbaren und plausiblen Ergebnissen führt. Keinesfalls ist der Lösungsvorschlag bereits der optimale Talsperrenbetrieb der fernen Zukunft, jedoch kann die vorgestellte Methodik für die Entwicklung eines solchen verwendet werden.

Als Ziel der Optimierung wurde eine Betriebsregel definiert, die bei erhöhter zukünftiger Belastung keine größeren Spitzenabgaben erzeugt als in der Vergangenheit. Dies ist nur eines von vielen möglichen Zielen. Würde als Optimierungskriterium ein in Vergangenheit und Zukunft konstantes Hochwasserrisiko gewählt, wäre das Ergebnis anders, wie das abschließende Kapitel diskutieren wird.

Das gewählte Optimierungsverfahren ist monokriteriell auf die Hochwasserspitzen ausgerichtet. Um eine maximale Leistungsfähigkeit des Algorithmus zu erreichen, wurde nur eine Entscheidungsvariable gewählt, die in den meteorologischen Wintermonaten die Abgabe aus allen Lamellen um den gleichen Anteil erhöht. Um die Auswirkungen auf den Niedrigwasserbereich zu minimieren, sollte für jede Lamelle eine eigene Entscheidungsvariable verwendet und die Erhöhung feiner abgestuft werden. Dies ist mit der vorgestellten Methodik möglich. Es würde die Aufgabenstellung hinsichtlich einer multikriteriellen Optimierung erweitern und ließe belastbarere Aussagen bezüglich der Niedrigwasseraufhöhung zu. Letztere konnte hier nur gestreift werden, da sie nicht Bestandteil der zu bearbeitenden Aufgabe war.

Loucks et al. (2005, S. 132) empfehlen, Optimierungsmodelle in erster Linie zur Verminderung der Alternativen einzusetzen, die anschließend in einem Simulationsmodell detailliert zu untersuchen sind. Dieser Empfehlung folgte der Autor. Es zeigte sich, dass der im Metamodell erarbeitete Optimierungsvorschlag durch die Evaluation im Wasserhaushaltsmodell

deutlich verändert wurde. Dies stimmt nachdenklich angesichts der in Abschnitt 5 diskutierten aktuellen Literatur, in der mit immer komplexeren Optimierungsalgorithmen und gleichbleibend einfachen Metamodellen Bewirtschaftungsoptimierung für Talsperrenverbundsysteme betrieben wird.

10 Synopse

Die Synopse führt die Ergebnisse dieser Arbeit zusammen und schließt mit einer umfassenden Diskussion der Ergebnisse am Beispiel der Sösetalsperre. Zunächst wird mittels einer Hochwasserstatistik über die Talsperrenabgaben die geänderte Hochwasserbelastung mit dem Hochwasserrisiko in Osterode zusammengeführt. Dies geschieht unter Berücksichtigung der in Abschnitt 3.4.2 abgeleiteten Bevölkerungsprognosen. Für alle in der Optimierung behandelten Talsperren werden die Auswirkungen der geänderten Betriebsregeln auf die Trinkwasser- und Energieproduktion ermittelt. Für die Sösetalsperre kann abschließend der Nutzen aus der geänderten Betriebsregel den dadurch entstehenden Kosten gegenübergestellt werden.

10.1 Hochwasserrisiko

Hochwasserstatistik unterhalb von Regelungsbauwerken ist ein Oxymoron, ein Widerspruch in sich. Hochwasserstatistik benötigt lange, homogene, also von Menschen unbeeinflusste Zeitreihen. Je länger die Zeitreihe und je höher ihre Variabilität, umso komplexer können die statistischen Methoden sein. Umso zuverlässiger werden ebenso die abgeleiteten Extremwerte des Abflusses sein. Es bedarf guter Gründe, sich über diesen Widerspruch hinwegzusetzen, denn Abgaben von Talsperren weisen eine geringe Variabilität auch bei langen Zeitreihen auf. Die gesetzlich geforderte Ausweisung von Überschwemmungsflächen für das HQ₁₀₀ motivierte, wie in Abschnitt 6.6.2 beschrieben, Brink und Meon (2004) zur Ermittlung eines HQ₁₀₀ am Pegel Mariental oberhalb von Osterode. Hierfür nahmen sie eine Talsperre unter Vollstau an und berücksichtigten nur ihre Seeretention. Unter dieser Annahme konnten sie die Extremwerte des quasi unbeeinflussten Pegels Riefensbeek zum Pegel Mariental übertragen. Der so ermittelte HQ₁₀₀-Abfluss betrug 57,4 m³/s. Für die Ausweisung von Überschwemmungsflächen ist dieses Vorgehen gerechtfertigt, führt jedoch zu einer deutlichen Unterschätzung der Hochwasserschutzwirkung der Talsperre, einer ihrer wichtigsten Funktionen. Folgerichtig geht das auf dieser Grundlage ermittelte Hochwasserrisiko als Nullvariante ‚ohne Hochwasserschutz‘ in die abschließende Betrachtung ein.

Da in dieser Arbeit die Risikominderung durch Talsperren monetarisiert werden soll, führt an einer auf stündlichen Jahreshöchstwerten der Talsperrenabgabe basierenden Hochwasserstatistik kein Weg vorbei. Dafür wurde als robustes Verfahren die Gumbel-Verteilung mit einer Schätzung der Parameter nach der Momentenmethode gewählt. Die Abbildung 10-1 zeigt das Ergebnis. Blau dargestellt ist die Extremwertverteilung für die Vergangenheit unter Verwendung der Betriebsregeln von 1989. Die Hochwassergefährdung steigt bei Modellierung der Zukunftsprojektion des REMO UBA-Laufs unter Beibehaltung der Betriebsregeln von 1989 für die ferne Zukunft deutlich an (rot). Die optimierten Betriebsregeln reduzieren die Hochwassergefährdung trotz erhöhter Belastung durch das Zukunftsszenario wieder auf das Ausgangsniveau (grün). Obwohl die Optimierung nur mit Bezug auf einzelne extreme Abgaben erfolgte, gilt das Ergebnis nicht nur für diese, sondern für die gesamte Verteilung der

Extremwerte. Dies ist auf die geringe Variabilität der Abgaben kleinerer Unterschreitungswahrscheinlichkeiten zurückzuführen. Das Optimierungsziel der konstanten Spitzenabgabe führt zu einer konstanten Gefährdung der Unterlieger bei geänderter Hochwasserbelastung der Talsperre.

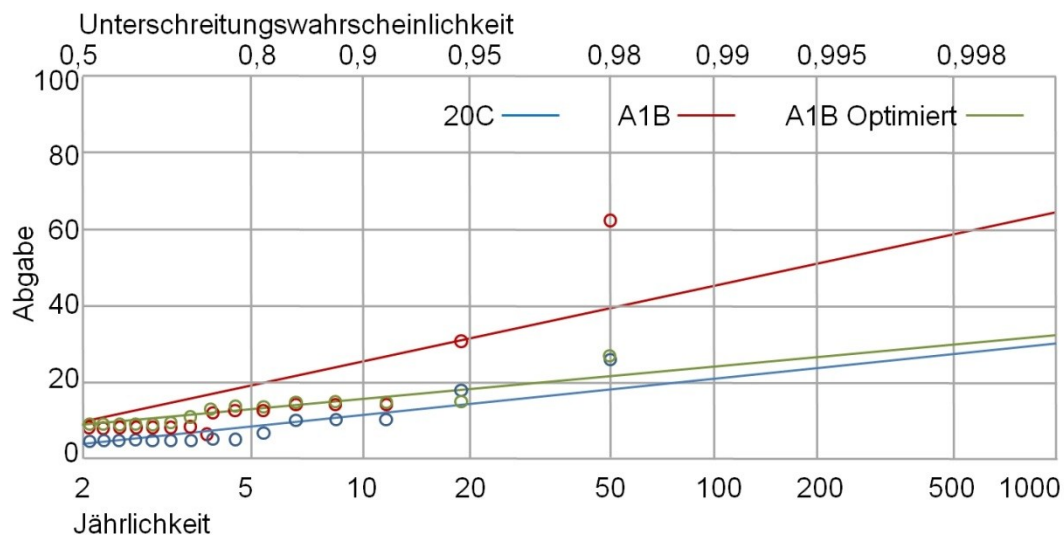


Abbildung 10-1: REMO UBA. Stündliche Jahresextremwerte der Talsperrenabgabe für die Vergangenheit (20C, 1971-2000), die ferne Zukunft (2071-2100) mit den Betriebsregeln von 1989 (A1B) und den optimierten Betriebsregeln (A1B Optimierte).

Die Tabelle 10-1 zeigt die Extremwerte für den in Abbildung 10-1 gezeigten UBA-Lauf und den dort nicht dargestellten BFG-Lauf. Trotz methodischer Unterschiede spiegeln die Ergebnisse diejenigen der Tabelle 8-2 wieder, die nicht auf der Gumbel-Verteilung, sondern der logarithmischen Normalverteilung basieren. Der REMO BFG-Lauf liefert sowohl am Zulaufpegel Riefensbeek als auch am Ablaufpegel Mariental deutlich geringere Werte als der REMO UBA-Lauf. Der Vergleich mit Tabelle 8-2 zeigt, dass nur die Ergebnisse des UBA-Laufs die Verhältnisse der Vergangenheit reproduzieren.

Tabelle 10-1: Extreme Abflüsse am Pegel Mariental unter der Sösetalsperre für REMO UBA und REMO BFG (Gumbel-Verteilung, Momentenmethode).

	REMO UBA			REMO BFG		
	20C	A1B	A1B Opt	20C	A1B	A1B Evl
HQ ₂₀ [m³/s]	16,30	29,91	17,07	10,75	15,69	16,87
HQ ₂₅	17,24	31,91	17,99	11,24	16,45	17,75
HQ ₅₀	20,15	38,10	20,84	12,75	18,79	20,44
HQ ₁₀₀	23,04	44,23	23,66	14,24	21,11	23,11
HQ ₂₀₀	25,91	50,34	26,48	15,73	23,43	25,77
HQ ₅₀₀	29,71	58,41	30,19	17,69	26,48	29,28
HQ ₁₀₀₀	32,57	64,51	33,00	19,18	28,79	31,94

Angesichts der zu geringen Abflüsse des BFG-Laufs ergab eine Ermittlung des Hochwasserrisikos für diesen keinen Sinn. Für den UBA-Lauf war mit den ermittelten Extremwerten eine Neuberechnung der in Abschnitt 6.6.4 beschriebenen direkten und indirekten Hochwasserrisiken in Osterode möglich. Dies wird anhand von Tabelle 10-2 erläutert. Sie zeigt neben dem

Risiko aus direkten Schäden an Gebäuden und Ausrüstung auch das indirekte Risiko aus Betriebsunterbrechung. Hierbei finden unterschiedliche Bevölkerungsprognosen Berücksichtigung.

Die erste Zeile der Tabelle wiederholt die Summen der Tabelle 6-5. Sie dienen hier als Nullvariante ‚ohne Hochwasserschutz‘. Da nur die Seeretention der Talsperre Berücksichtigung findet, fällt das Risiko deutlich höher aus als in den Varianten, die mit den Extremwerten der Talsperrenabgabe aus Abbildung 10-1 berechnet wurden.

Die beste Schätzung für die heutige Hochwasserschutzleistung der Sösetalsperre ist die Differenz aus der Variante ‚Seeretention‘ und der Variante ‚A1B Optimiert‘ unter Verwendung der heutigen Bevölkerungsdichte. Unterschiede zwischen der Variante ‚A1B Optimiert‘ und dem gegenwärtig nicht beherrschten Hochwasserrisiko würden nur aus den sehr geringen Differenzen der Abflüsse in den Spalten zwei und vier der Tabelle 10-1 stammen. Die daraus resultierenden Unterschiede in den Wasserspiegellagen sind mit der gewählten Methode nicht darstellbar. Sie wären auch bei einer Ermittlung mit einem zweidimensionalen hydrodynamischen Modell nicht signifikant. Danach stellt der Talsperrenbetreiber mit dem Hochwasserschutz der Sösetalsperre allein eine öffentliche Dienstleistung im Wert von $787\,072 - 421\,491 = 365\,581$ €/a zur Verfügung.

Tabelle 10-2: *Direktes und indirektes Hochwasserrisiko in €/a für Osterode im Harz und die mit dem REMO UBA-Lauf untersuchten Varianten für unterschiedliche Bevölkerungsprognosen.*

Preisstand 2009	Gebäude	Ausrüstung	Betriebsunterbrechung	Summe
Heutige Bevölkerung				
Seeretention	264.243	410.151	112.678	787.072
A1B	208.945	338.406	89.846	637.197
A1B Optimiert	131.143	233.637	56.711	421.491
Prognose A1B				
A1B	115.599	187.224	49.707	352.530
A1B Optimiert	72.716	129.260	31.375	233.352
Prognose A2				
A1B	152.830	247.522	65.716	466.068
A1B Optimiert	95.923	170.890	41.480	308.293

Die Bewertung des Szenarios für die ferne Zukunft ist abhängig von der verwendeten Bevölkerungsprognose. Das demografische Szenario A1B mit sehr starker Bevölkerungsabnahme aus Abbildung 3-5, führt zu einem Wert der optimierten Betriebsregel von $352\,530 - 233\,352 = 119\,178$ €/a. Er ergibt sich aus der Differenz der beiden Szenarien für diese Prognose. Legt man das demografische Szenario A2 mit mäßiger Bevölkerungsabnahme zu Grunde, steigt der Wert auf $157\,774$ €/a. Im Mittel liegt der Wert bei $138\,476$ €/a $\pm 14\%$. Aus den Angaben zur Kapitalintensität aus Tabelle 6-2 lässt sich eine gewisse Variabilität für die Jahresreihe 2005-2009 ableiten. Ihr Einfluss auf das Ergebnis beträgt $\pm 7\%$.

Die in Tabelle 10-2 gezeigten und daraus abgeleiteten Beträge müssen angesichts erheblicher Unsicherheiten in der Modellkette, die nur für die Bevölkerungsprognose, nicht aber für die Klimamodelle quantifiziert werden konnten, als Nachweis der prinzipiellen Möglichkeit der

Ermittlung gesehen werden, keinesfalls als belastbare Zahlen für wasserwirtschaftliche Planungen.

10.2 Trinkwasser- und Energieproduktion

In diesem Abschnitt wird untersucht, welchen Einfluss der hinsichtlich des Hochwasserschutzes optimierte Betrieb auf die anderen monetarisierbaren Nutzungen der Talsperren im Westharz hat. Hierzu vergleicht Tabelle 10-3 Trinkwasser- und Energieproduktion. In der linken Hälfte sind Produktionsmengen gezeigt. Die zweite Spalte wiederholt die in Tabelle 8-1 für die Vergangenheit des Klimamodells ermittelten Werte. Die rechte Seite der Tabelle 10-3 stellt die aus den Produktionsmengen resultierende Bruttowertschöpfung dar. Die Ermittlung der Bruttowertschöpfung des Talsperrenbetreibers wurde in Abschnitt 2.2.2.3 beschrieben. Ihre Verwendung stellt eine Vergleichbarkeit mit den in der Hochwasserrisikoanalyse verwendeten volkswirtschaftlichen Daten, insbesondere der Betriebsunterbrechung, sicher.

Tabelle 10-3: *Trinkwasser- und Energieproduktion für die untersuchten Varianten für REMO UBA (oben) und REMO BFG (unten).*

UBA 20C			UBA A1B			UBA 20C			UBA A1B		
Regel 1989			Regel 1989			Regel 1989			Regel 1989		
			Optimiert						Optimiert		
Trinkwasserproduktion			Mio m³/Monat			Bruttowertschöpfung €/a					
Grane	3,027		3,579		3,570	9.283.861	10.976.854		10.949.251		
Ecker	0,629		0,742	-		1.929.154	2.275.727	-			
Söse	1,243		1,259		1,243	3.812.302	3.861.374		3.812.302		
Energieproduktion			Mio kWh/Jahr			Bruttowertschöpfung €/a					
Grane	0,60		0,68	-		24.662	27.953	-			
Oker	12,07		14,89		14,518	494.296	609.919		594.761		
Ecker	0,62		0,86	-		25.495	35.368	-			
Söse	2,91		3,35		3,248	119.324	137.308		133.075		
Oder	3,65		4,86	-		149.475	199.155	-			

BFG 20C			BFG A1B			BFG 20C			BFG A1B		
Regel 1989			Regel 1989			Regel 1989			Regel 1989		
			Optimiert						Optimiert		
Trinkwasserproduktion			Mio m³/Monat			Bruttowertschöpfung €/a					
Grane	3,261		3,625		3,571	10.001.543	11.117.937		10.952.318		
Ecker	0,681		0,702	-		2.088.639	2.153.046	-			
Söse	1,264		1,264		1,247	3.876.710	3.876.710		3.824.570		
Energieproduktion			Mio kWh/Jahr			Bruttowertschöpfung €/a					
Grane	0,65		0,68	-		26.574	27.830	-			
Oker	12,77		15,09		14,66	523.055	618.317		600.715		
Ecker	0,68		0,81	-		27.844	33.347	-			
Söse	3,16		3,46		3,27	129.442	141.774		134.017		
Oder	4,16		5,00	-		170.273	204.877	-			

Die Produktionsseite zeigt, dass der Wasserreichtum der Zukunftsprojektion A1B im REMO UBA-Lauf sowohl in der Trinkwasser- als auch in der Energieproduktion unter Beibehaltung der Betriebsregel von 1989 Zugewinne ermöglicht. Während die Trinkwasserzugewinne an

der Grane auch im optimierten Szenario zumindest teilweise erhalten bleiben, gehen sie an der Söse verloren. Dort sinkt die Trinkwasserproduktion durch die Optimierung auf den Ausgangszustand. Bei der Energieerzeugung gehen die Zugewinne nur teilweise durch die Optimierung verloren.

Die Ergebnisse des REMO BFG-Laufs stützen die des UBA-Laufs, wobei es im Detail zu Unterschieden kommt. Beispielsweise steigt die Trinkwasserproduktion der Sösetalsperre hier für das Zukunftsszenario nicht an, sinkt aber in der optimierten Variante. Zugewinn und Verlust durch Optimierung sind am Trinkwasserwerk der Grantalsperre höher.

Für die Monetarisierung wurden Mittelwerte der Jahresreihe 2002-2008 aus den Geschäftsberichten der Harzwasserwerke gebildet. Für die Trinkwasserproduktion lag dieser Wert bei 0,44 €/m³, für die Energieproduktion bei 0,07 €/kWh. Der Anteil der Bruttowertschöpfung an der Unternehmensleistung lag im Mittel der Jahresreihe bei 58,5%. Dieser Wert wurde auf die berechneten Erlöse angewendet, da die im rechten Teil der Tabelle gezeigte Bruttowertschöpfung den Beitrag des Talsperrenbetreibers zum Gemeinwohl darstellt und einen direkten Vergleich auf Jahresbasis mit dem Hochwasserrisiko erlaubt. Betrachtet man die letzten beiden Spalten der Tabelle, zeigt sich, dass sich durch die Optimierung Wertschöpfungsverluste ergeben. Sie betragen für die Trinkwassergewinnung an der Sösetalsperre beispielsweise $3\,861\,374 - 3\,812\,302 = 49\,072$ €/a, für die Energiegewinnung ergeben sich $137\,308 - 133\,075 = 4\,233$ €/a. Die durch die Optimierung hinsichtlich des Hochwasserschutzes auftretenden Bruttowertschöpfungsverluste an der Sösetalsperre betragen damit für die ferne Zukunftsprojektion des UBA-Laufs von REMO 53 306 €/a. Dies sind 55% der an den drei betrachteten Talsperren ermittelten Wertschöpfungsverluste von insgesamt 96 067 €/a. Auf der Grundlage des BFG-Laufs ergeben sich insgesamt 243 117 €/a.

10.3 Diskussion

Die Ausführungen des Kapitels 10 zeigen die Möglichkeit einer ökonomischen Bewertung sowohl des Klimawandel-Einflusses als auch der optimierten Betriebsregel auf der Grundlage volkswirtschaftlicher und betriebswirtschaftlicher Daten. Diese Leistung wurde in keiner der in der Literaturstudie untersuchten Quellen auf der Basis detaillierter Modellierung erbracht und ist daher ein wesentlicher innovativer Zug dieser Arbeit. Im Ergebnis stellt der durch die Sösetalsperre bereitgestellte Hochwasserschutz für Osterode ein sehr wertvolles öffentliches Gut dar. Abbildung 10-2 zeigt die Ortslage unterhalb der Talsperre.

Die im Folgenden genannten Beträge demonstrieren angesichts erheblicher Unsicherheiten in der Modellkette die Anwendbarkeit der Methodik, sie sind nicht als Grundlage für wasserwirtschaftliche Planungen zu verstehen. Die zum Hochwasserrisiko genannten Zahlen sind mit Vorsicht zu verwenden, da einerseits die Ermittlung der Überschwemmungsflächen auf einer qualifizierten Schätzung beruht und andererseits das Verfahren zur Wertermittlung bisher nicht an real aufgetretenen Hochwasserschäden überprüft wurde.



Abbildung 10-2: Die Ortslage Osterode unterhalb der Söse-Talsperre. Eigene Darstellung unter Verwendung von Satellitenbildern aus Google Maps.

Anhand der Abbildung 10-3 werden die Ergebnisse dieser Arbeit am Beispiel der Sösetalsperre diskutiert, da sie das größte Nutzungsspektrum aufweist. Die Abbildung stellt im oberen Teil den Einfluss des Klimawandels auf die monetarisierten Talsperrennutzungen sowie den Einfluss der Betriebsanpassung dar. Im unteren Teil sind die relativen Änderungen gegenüber der Vergangenheit angegeben. Die Darstellung beruht auf den in Tabelle 10-2 und Tabelle 10-3 gezeigten Zahlen. Oben links in der ersten Spalte beginnend stellt die Trinkwassergewinnung mit einer Bruttowertschöpfung von etwas über 3,8 Mio €/a den größten Beitrag zum Gesamtnutzen dar. An zweiter Stelle folgt der Hochwasserschutz mit einem Beitrag von rund 365 000 €/a, gefolgt von der Energieerzeugung mit beinahe 120 000 €/a.

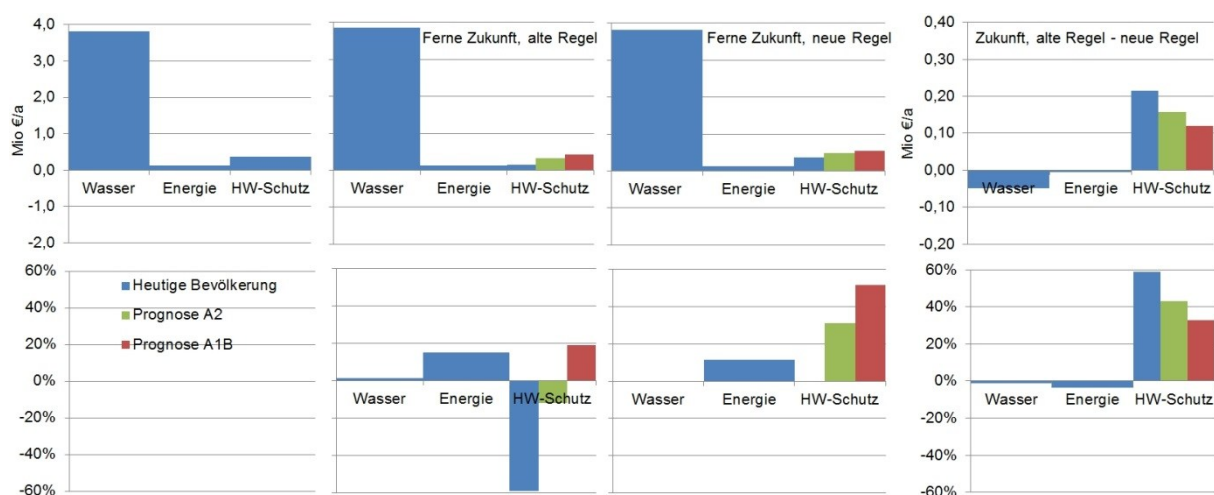


Abbildung 10-3: Absolute (oben) und relative (unten) Werte für die monetäre Änderung von Nutzungen der Sösetalsperre für die Vergangenheit und die Projektion des REMO-UBA-Laufs für die ferne Zukunft 2071–2100 und unterschiedliche Bevölkerungsprognosen.

Der Hochwasserschutz berechnet sich nach Tabelle 10-2 als Differenz aus der Variante ‚Seeretention‘ und der Variante ‚A1B Optimiert‘ unter Verwendung der heutigen Bevölkerungsdichte. Er stellt die Risikominderung, also einen echten Beitrag zum Gesamtnutzen dar.

Die zweite Spalte der Abbildung 10-3 zeigt den Einfluss des Klimawandels im fernen Zukunftsszenario bei Verwendung der Betriebsregel von 1989. Hier spielt die gewählte Bevölkerungsprojektion eine ganz wesentliche Rolle. Die Änderungen in absoluten Zahlen sehen nicht dramatisch aus, ein Blick auf die relativen Zahlen zeigt jedoch, dass mit Zugewinnen von zwei Prozent in der Trinkwasser- und 15% in der Energieerzeugung ein Rückgang des Hochwasserschutzes um beinahe 60% einhergeht. Dies setzt allerdings ein Verharren der Bevölkerungsdichte in der fernen Zukunft auf heutigem Niveau voraus, was angesichts der Ausführungen des Abschnitts 3.4.2 unwahrscheinlich ist. Im demografischen Szenario A2 mit gemäßigttem Bevölkerungsrückgang von 27% sinkt der Hochwasserschutz wegen geringerer Exposition nur um zwölf Prozent. Der starke Bevölkerungsrückgang des demografischen Szenarios A1B von 44% führt zu einer Verbesserung des Hochwasserschutzes um 18%, da hier die Auswirkungen des demografischen Wandels die Auswirkungen des Klimawandels deutlich übertreffen: Der Rückgang der Exposition - und damit der Vulnerabilität - ist stärker als die Zunahme der Gefährdung.

Dieses Ergebnis überrascht zunächst. Es ist darauf zurückzuführen, dass das Ziel der Optimierung eine konstante Hochwassergefährdung bei vergrößerter Hochwasserbelastung der Talsperre ist. Die Bemessung auf einen Abflusswert für eine bestimmte Jährlichkeit, also eine bestimmte Gefährdung, ist das klassische Vorgehen im Hochwasserschutz. Verfahren, die auf dem Hochwasserrisiko beruhen, werden sich im Rahmen der Umsetzung der EU Hochwasserrichtlinie (Richtlinie 2007/60/EG) zunehmende durchsetzen. Eine solche Risiko-orientierung bedeutet im vorliegenden Zusammenhang, dass in der fernen Zukunft die gleiche Gefährdung je nach Bevölkerungsprojektion auf eine deutlich geringere Vulnerabilität trifft. Daraus resultiert eine Verbesserung des Hochwasserschutzes, umso stärker, je geringer das Risiko als Produkt aus Gefährdung und Vulnerabilität ist. Eine risikobasierte Bemessung des Hochwasserschutzes erlaubt im Umkehrschluss in der fernen Zukunft deutlich höhere Spitzenabgaben. Sie könnten in einem Optimierungsprozess solange erhöht werden, bis das heutige Hochwasserrisiko wieder erreicht ist. Ob dafür eine gesellschaftliche Akzeptanz zu erreichen ist, ist allerdings fraglich.

Der Trinkwasserabsatz wird in diesem Szenario konstant gehalten. Zwar wird der demografische Wandel allgemein auch zu einem Rückgang desselben führen. Die Eigentümerstruktur des Talsperrenverbundes lässt allerdings auf viele großstädtische Absatzgebiete schließen. Sie sind vom Bevölkerungsrückgang weit weniger betroffen, auch ein Anstieg ist hier möglich. Höhere Temperaturen sind ein weiterer Faktor, der einen Bedarfsanstieg begünstigt. Es wird ebenfalls davon ausgegangen, dass der Strommarkt die regenerative Energie aus Wasserkraft auch in Zukunft immer vollständig aufnehmen kann. Da Trinkwasser- und Energieabsatz als vom demografischen Wandel unbeeinflusst angenommen werden, sind sie durchgängig in der für die heutige Bevölkerung gewählten blauen Farbe dargestellt.

Die dritte Spalte der Abbildung zeigt die Auswirkungen der geänderten Betriebsregel auf die Nutzungen im fernen Zukunftsszenario. Die Zugewinne im Trinkwasserbereich gehen verloren, der Anstieg der Energieproduktion beträgt im Vergleich zur Vergangenheit nicht mehr

15, sondern geringere 13%. Die Optimierung der Betriebsregel geht von konstanter Gefährdung bei heutigem Bevölkerungsniveau aus, die Verschlechterung des Hochwasserschutzes um 60% wird daher genau ausgeglichen. Für die demografischen Szenarien mit Bevölkerungsrückgang folgt daraus wegen der oben diskutierten Gründe eine Verbesserung des Hochwasserschutzes um rund 30 bis 50%.

Die letzte Spalte der Abbildung 10-3 zeigt die Unterschiede, die sich durch Verwendung der optimierten im Vergleich zur existierenden Betriebsregel im fernen Zukunftsszenario ergeben. Die Skalierung der absoluten Zahlen ist hier um eine Größenordnung kleiner gewählt als in den vorhergehenden Spalten. Abhängig vom Bevölkerungsszenario liegt der Wert der geänderten Betriebsregel bei 216 000 €/a (heutige Bevölkerung), 158 000 €/a (Szenario A2) und 119 000 €/a (Szenario A1B).

Diesem großen Nutzen der neuen Betriebsregel stehen Wertschöpfungsverluste aus Trinkwasser- und Energieerzeugung in Höhe von 53 306 €/a an der Sösetalsperre gegenüber. Die Nutzen-Kosten-Relation liegt damit zwischen 2 und 3 (Tabelle 10-4).

Tabelle 10-4: Nutzen-Kosten-Relation in Abhängigkeit der Bevölkerungsprognose

Bevölkerung	Nutzen [€/a]	Kosten [€/a]	NKR
Heutige	216 000	53 000	4,08
A2	158 000		2,98
A1B	119 000		2,25

Würden die Bewertungsmaßstäbe des Bundesverkehrswegeplans zu Grunde gelegt, wäre die Maßnahme ab einer Nutzen-Kosten-Relation von drei umzusetzen. Für eine Hochwasserschutzmaßnahme ist diese Betriebsanpassung sehr wirtschaftlich. Der Talsperrenbetreiber könnte für seine Wertschöpfungsverluste Kompensationen erhalten.

Sowohl die genannten Beträge als auch die Spannweite der Nutzen-Kosten-Relation beziehen nur die Unsicherheit der Bevölkerungsprognosen ein und müssen angesichts weiterer erheblicher Unsicherheiten in der Modellkette, die nicht quantifiziert werden konnten, als Nachweis der prinzipiellen Möglichkeit der Ermittlung gesehen werden, nicht als belastbare Zahlen für konkrete Planungen.

11 Schlussfolgerungen

Klima wird nach Empfehlung der „World Meteorological Organization“ auf der Grundlage langer Zeitreihen von 30 Jahren beschrieben. Dies ist aufgrund der Definition von Klima als dem für einen relativ großen Zeitraum charakteristischen statistischen Verhalten der Atmosphäre erforderlich. Für die Klimafolgenabschätzung wird daher ein Talsperrenmodell benötigt, das über einen 30-jährigen Zeitraum von einem konstanten Betrieb ausgeht. Nur so wird der Einfluss klimatischer Änderungen auf den Betrieb sichtbar. Eine Modellierung auf Tagesbasis wurde für diese Fragestellung gewählt, da Beobachtungen auf Stundenbasis für eine so lange Zeitreihe nicht vorliegen. Ein solches Modell ist notwendiger Weise eine Abstraktion, da es einen so langfristigen konstanten Betrieb in der Realität nicht gibt. Talsperrenverbundsysteme unterliegen einem ständigen Veränderungsprozess, in dem sie an sich ändernde Rahmenbedingungen angepasst werden. Diese Änderungen sind im Westharzmodell nicht darstellbar.

Die Modellierung kleiner Einzugsgebiete im Mittelgebirge ist eine Herausforderung. Die Variabilität ist hoch und die Wahrscheinlichkeit, dass sich Fehler gegenseitig aufheben, gering. Die in der Modellkalibrierung erzielten guten bis sehr guten Ergebnisse zeigen, dass die Modellstruktur des Westharzmodells geeignet ist, Langzeitkontinuen für kleine Einzugsgebiete im Mittelgebirge mit integriertem Talsperrenbetrieb zu modellieren. Produktionsmengen und Überleitungen reproduziert das Modell im langjährigen Mittel der Zeitreihe 1971 – 2000 sehr gut. Gleiches gilt für Talsperreninhalte, Abgaben und Abflüsse an Bezugspegeln. Das Modell repräsentiert die langfristige Systemcharakteristik und wird damit der Aufgabenstellung in sehr guter Weise gerecht. Die tages- und stundengenaue Abbildung des Betriebs bleibt einem Echtzeitbetriebssystem vorbehalten. Ein solches kann aus dem vorhandenen Modell abgeleitet werden. Dies bedingt allerdings die Abbildung einer großen Menge detaillierter Informationen zum Betriebsgeschehen im Modell, was die Überarbeitung einiger Module, insbesondere der Verzweigungen, erfordert.

Die Hochwassercharakteristik der kleinen Einzugsgebiete des Untersuchungsgebiets kann nur auf Stundenbasis wiedergegeben werden, da der Tagesmittelwert die Hochwasserscheitel weitestgehend nivelliert. Daher wurde für den kurzen Zeitraum 2002-2008, für den derart hoch aufgelöste Eingangsdaten vorlagen, ein Modell im Stundenzeitschritt kalibriert. Dies wäre allerdings ohne eine Orientierung am Tageszeitschritt-Modell nicht möglich gewesen, da beispielsweise eine der Talsperren in diesem Zeitraum zwei Jahre außer Betrieb war. Auch das Stundenmodell gibt die Charakteristik des Talsperrenbetriebs gut wieder. Tages- und Stundenzeitschrittmodell ergänzen sich bei der Lösung der Aufgabenstellung, keines von beiden ist verzichtbar.

Der Erfolg der Modellierung mit Daten der regionalen Klimamodelle WETTREG und REMO ist stark von der Wiedergabe der Niederschlagsverteilung und -höhe in den Modellen abhängig. In den Klimamodellen ist das Gebiet mit den höchsten Niederschlägen vom Bereich zwischen Brocken und Bruchberg um ca. 5 km südwest-westlich in den Bereich südlich des Bruchbergs verschoben. Weiterhin sind die Jahresniederschläge in den extremen Höhenla-

gen um bis zu 250 mm/a zu gering wiedergegeben. Dies lässt sich auf die grobe räumliche Auflösung der Klimamodelle zurückführen.

Qualitative Aussagen können auf der Grundlage der Klimamodelle für alle Einzugsgebiete des Untersuchungsgebiets getroffen werden. Langjährige Quartalsmittelwerte der Abflüsse sowie ihre zukünftige Entwicklung werden von beiden Modellen ähnlich wiedergegeben, die Modelle stützen sich gegenseitig. Das trifft besonders auf eine deutliche Zunahme des Abflusses im Winter zu. Anders stellt sich die Entwicklung der winterlichen Hochwasserextreme dar. Während WETTREG auf der Grundlage von Tageswerten einen Rückgang prognostiziert, deutet REMO auf der Grundlage von Stundenwerten eine starke Zunahme in der fernen Zukunft 2071–2100 an. So zeigt sich die Unverzichtbarkeit der Verwendung eines Stundenmodells für das Untersuchungsgebiet.

Quantitative Aussagen können auf der Grundlage der Klimamodelle nur für solche Talsperren gemacht werden, die nicht einen wesentlichen Anteil ihrer Zuflüsse aus den extremen Höhenlagen des Untersuchungsgebiets erhalten. Damit fielen Ecker- und Odertalsperre aus dem Untersuchungsprogramm zur Optimierung des Hochwassermanagements heraus. Die Granetalsperre hat die Charakteristik eines Zwischenspeichers für das zentrale Wasserwerk. Im Wesentlichen von Überleitungen gefüllt und ohne ein Einzugsgebiet mit nennenswerter Hochwassergefahr, kann sie nicht Gegenstand einer Optimierung hinsichtlich Hochwassermanagement sein. Damit reduzierte sich diese Fragestellung auf Innerste-, Oker- und Sösetalsperre.

Die Anpassung an die zukünftige Hochwassergefährdung erfolgte mit einem Metamodell. Es berechnete auf der Basis der im Wasserhaushaltsmodell ermittelten Zuflüsse sowie der Betriebsregeln Abgaben und Speicherinhalte. Dieses sehr effiziente Modell wurde mit einem genetischen Algorithmus optimiert: Für die Monate des meteorologischen Winters Dezember bis Februar optimierte der Algorithmus die Abgaben. Als Ziel wurde gewählt, in den Projektionen der fernen Zukunft 2071–2100 die Abgaben in den Wintermonaten derart zu erhöhen, dass die größte Abgabe in der Zukunft nicht höher liegt als im Vergleichszeitraum 1971–2000. Dieses ‚konstante Gefährdung‘ genannte Ziel ist nur eines von vielen möglichen. Seine Erreichung gelingt bei einer Erhöhung, die - für alle drei Talsperren unterschiedlich - im Bereich zwischen 30 und 600% liegt. Damit ist eine Anpassung an die zukünftige Hochwasserbelastung mit dem heutigen System technisch möglich.

Die Auswirkungen der deutlichen Erhöhung der Winterabgaben erstrecken sich bis in den Sommer. Selten, und erst ab 2090 zunehmend, sinken die jährlichen minimalen Speicherinhalte durch die Optimierung bezüglich des Hochwasserschutzes. Das gewählte Optimierungsverfahren ist monokriteriell auf die Spitzenabgaben ausgerichtet. Eine maximale Leistungsfähigkeit des Algorithmus ließ nur eine Entscheidungsvariable zu. Um die Auswirkungen auf den Niedrigwasserbereich zu minimieren, sollte für jede Lamelle eine eigene Entscheidungsvariable verwendet werden. Das ist mit der vorgestellten Methodik möglich. Es würde die Aufgabenstellung hinsichtlich einer multikriteriellen Optimierung erweitern und ließe belastbarere Aussagen bezüglich der Niedrigwasseraufhöhung zu.

Eine besondere innovative Leistung dieser Arbeit ist die integrierte Bewertung der Anpassung an die geänderte Hochwasserbelastung. Ihr ökonomischer Wert für die Unterlieger wurde durch eine Risikoanalyse auf der Grundlage volkswirtschaftlicher Daten ermittelt. Ein

vom Autor entwickeltes Verfahren der Expositionsanalyse ermöglichte die Berücksichtigung von demografischen Szenarien und deren Einfluss auf das Risiko. Dabei stellte sich heraus, dass bei einem Bevölkerungsrückgang von 44% der Einfluss des demografischen Wandels den des Klimawandels bereits deutlich übersteigt: Auch ohne Anpassung der Betriebsregeln an die geänderte Hochwassergefährdung verbessert sich der Hochwasserschutz dann um 18%. Der Rückgang der Exposition - und damit der Vulnerabilität - ist stärker als die Zunahme der Gefährdung. Ein Bevölkerungsrückgang um bis zu 25% wird im Untersuchungsgebiet bereits für 2030 erwartet, 44% zum Ende des Jahrhunderts sind also durchaus im Bereich des Möglichen.

Die Auswirkungen auf den Verbundbetrieb, insbesondere auf die Trinkwassergewinnung und die Energieproduktion, wurden unter der Verwendung von Veröffentlichungen des Talsperrenbetreibers abgeschätzt. Die durch ein höheres Wasserdargebot in der fernen Zukunft möglichen Zugewinne werden im Ergebnis durch die Anpassung des Hochwasserschutzes teilweise aufgezehrt. Diese Einbußen betragen beispielsweise an der Söse rund 53 000 €/a.

Der durch Verminderung der zukünftigen Hochwassergefährdung auf das heutige Niveau unterhalb der Sösetalsperre entstehende Nutzen führt zu einer Nutzen-Kosten-Relation im Bereich zwischen zwei und drei. Dies ist das Ergebnis einer an der Gefährdung orientierten Anpassung des Hochwasserschutzes. Eine am Risiko orientierte Betrachtung stellt letzterer eine Abnahme des Risikos durch den demografischen Wandel einerseits und durch die Anpassung der Betriebsregel andererseits gegenüber. Während bei der Betrachtung der Gefährdung eine Konstanz des Hochwasserschutzes gegeben scheint, tritt bei der Betrachtung des Risikos eine deutliche Verbesserung desselben hervor. Im Rahmen eines modernen Hochwasserrisikomanagements könnte damit auch eine Erhöhung der Gefährdung (d.h. der Abgaben) diskutiert werden, wenn der Hochwasserschutz im Vergleich von Vergangenheit und Zukunft nicht als konstante Gefährdung, sondern als konstantes Risiko definiert wird.

Während im hydrologischen Teil der Arbeit die technische Machbarkeit einer Anpassung an die geänderte Hochwasserbelastung herausgearbeitet wurde, ermöglicht ihr sozioökonomischer Teil die Diskussion, in welchem Ausmaß eine solche Anpassung gesellschaftlich wünschenswert ist. Zwar stehen die vorgestellten Zahlen unter einem Unsicherheitsvorbehalt, die vorgestellte Methodik kann aber mit Sicherheit für eine Anpassung des Hochwasserschutzes verwendet werden.

Es gelang in dieser Arbeit, quantitative Aussagen zum Einfluss des Klimawandels auf Talsperrenverbundsysteme zu treffen. In der nahen Zukunft (2021–2050) sind eher geringe Änderungen zu erwarten, große Änderungen treten erst im Zeitraum 2071–2100 auf. Damit bleibt genug Zeit, die Auswirkungen des Klimawandels auf Basis höher aufgelöster regionaler Klimamodelle der nächsten Generation mit den hier erarbeiteten Werkzeugen zu untersuchen und Anpassungsstrategien zu entwickeln. Die Veröffentlichung des fünften Sachstandsberichts des Weltklimarats steht kurz bevor.

12 Literatur

- AK ETR, 2011. Arbeitskreis Erwerbstätigenrechnung des Bundes und der Länder: Erwerbstätige in Vollzeitäquivalenten in den kreisfreien Städten und Landkreisen der Bundesrepublik Deutschland 1999 bis 2009. Reihe 2 Band 3.
- AK VGR, 2010. Arbeitskreis Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung der Länder: Bruttoanlageinvestitionen in den Ländern und Ost-West-Großraumregionen Deutschlands 1991 bis 2008. Reihe 1 Band 3. Stuttgart.
- AK VGR, 2011. Arbeitskreis Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung der Länder: Bruttoinlandsprodukt, Bruttowertschöpfung in den kreisfreien Städten und Landkreisen Deutschlands 1992 und 1994 bis 2009. Reihe 2, Band 1.
- Anderson, E., 1973. National Weather Service River Forecast System – Snow Accumulation and Ablation Model (No. 17), NOAA Technical Memorandum NWS Hydro.
- Asokan, S.M., Dutta, D., 2008. Analysis of water resources in the Mahanadi River Basin, India under projected climate conditions. *Hydrological Processes* 22, 3589–3603.
- Bäck, T., 1995. Evolutionary algorithms in theory and practice: evolution strategies, evolutionary programming, genetic algorithms. Oxford University Press, Oxford.
- Barnett, T.P., Pierce, D.W., 2009. Sustainable water deliveries from the Colorado River in a changing climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences*.
- Baur, F., Hess, P., Nagel, H., 1944. Kalender der Großwetterlagen Europas 1881-1939. Forschungsinstitut für langfristige Witterungsvorhersage, Bad Homburg v. d. H.
- BELF, 1990. Der Bundesminister für Ernährung Landwirtschaft und Forsten: Bewertungsgutachten für Deichbauvorhaben an der Festlandküste - Modellgebiet Wesermarsch. Forschungsbericht, Bonn.
- Bellman, R., 1957. Dynamic Programming. Princeton University Press, Princeton.
- Bergström, S., 1992. The HBV model - Its structure and applications (No. 4). Swed. Meteorol. and Hydrol. Inst.
- Bergström, S., Carlsson, B., Gardelin, M., Lindström, G., Pettersson, A., Rummukainen, M., 2001. Climate change impacts on runoff in Sweden. Assessments by global climate models, dynamical downscaling and hydrological modelling. *Clim Res* 16, 101–112.
- Beven, K., 1989. Changing ideas in hydrology — The case of physically-based models. *Journal of Hydrology* 105, 157–172.
- BHO, 2009. Bundeshaushaltsordnung vom 19. August 1969 (BGBl. I S. 1284), die zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2580) geändert worden ist (BHO 2009).
- Birn, C., Bolik, H., Rieken, P., 2005. Die Gesamtwirtschaftliche Bewertungsmethodik - Bundesverkehrswegeplan 2003.
- Blaich, M.C., 2005. Montanarchäologische Untersuchungen im Pandelbachtal bei Münchendorf/Seesen - durch Zisterzienser geprägte Kulturlandschaft im westlichen Harzvorland. *Berichte zur Denkmalpflege in Niedersachsen* 25.
- BLfU, 2005. Klimaänderungsfaktoren bei Planungen für den Hochwasserschutz, Gewässerkundlicher Jahresbericht für Bayern.
- BMVBS, 2011. KLIWAS Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.
- Bodnar, H., 2013. Innerstetalsperre hat Hildesheim vor Rekordpegelstand bewahrt (Pressemitteilung vom 6. Juni). Harzwasserwerke GmbH, Hildesheim.
- Boess, J., Gehrt, E., Müller, U., Ostmann, U., Sbresny, J., Steininger, A., 2004. Erläuterungsheft zur digitalen nutzungsdifferenzierten Bodenkundlichen Übersichtskarte 1:50.000 (BÜK50n) von Niedersachsen, Arbeitshefte Boden. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Böhm, U., Kücken, M., Ahrens, W., Block, A., Hauffe, D., Keuler, K., Rockel, B., Will, A., 2006. CLM - The Climate Version of LM: Brief Description and Long-Term Applications, COSMO Newsletter No. 6.

- Brekke, L.D., Maurer, E.P., Anderson, J.D., Dettinger, M.D., Townsley, E.S., Harrison, A., Pruitt, T., 2009. Assessing reservoir operations risk under climate change. *Water Resour. Res.* 45.
- Bremicker, M., 2000. Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM. Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele, Freiburger Schriften zur Hydrologie. Institut für Hydrologie, Universität Freiburg.
- Brink, S., Meon, G., 2004. Berechnung extremer Abflussscheitel in der Söse. Technische Universität Braunschweig, Leichtweiß-Institut für Wasserbau (unveröffentlicht), Braunschweig.
- Brockner, W., 1992. Frühe Buntmetallgewinnung in der Harzregion. In: Berichte zur Denkmalpflege in Niedersachsen. Veröffentlichung des Niedersächsischen Landesverwaltungsamtes – Institut für Denkmalpflege – Hannover.
- Bronstert, A.H., 2004. Möglichkeiten zur Minderung des Hochwasserrisikos durch Nutzung von Flutpoldern an Havel und Oder. Schlussbericht zum BMBF-Projekt im Rahmen des Vorhabens „Bewirtschaftungsmöglichkeiten im Einzugsgebiet der Havel“.
- Brüning, B., Uhden, O., 1961. Hydrographische Karte für Niedersachsen, Maßstab 1:100000, Christian Hinck, Hannover. ed.
- Bucher, H., Schlömer, C., Wilke, N., 2009. Raumordnungsprognose 2025/2050. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung.
- Buishand, T.A., Brandsma, T., 2001. Multisite simulation of daily precipitation and temperature in the Rhine Basin by nearest-neighbor resampling. *Water Resources Research* 37, 2761–2776.
- Burnash, R.J.C., Ferral, R.L., McGuire, R.A., 1973. A generalized streamflow simulation system - Conceptual modeling for digital computers. U.S. National Weather Service and California Department of Water Resources.
- Cai, X., McKinney, D.C., Lasdon, L.S., 2001. Solving nonlinear water management models using a combined genetic algorithm and linear programming approach. *Advances in Water Resources* 24, 667–676.
- Chandramouli, V., Raman, H., 2001. Multireservoir modeling with dynamic programming and neural networks. *J. Water Resour. Plan. Manage.*
- Chen, S.-T., Yu, P.-S., 2007. Pruning of support vector networks on flood forecasting. *Journal of Hydrology* 347, 67–78.
- Chen, S.-T., Yu, P.-S., Liu, B.-W., 2011. Comparison of Neural Network Architectures and Inputs for Radar Rainfall Adjustment for Typhoon Events. *Journal of Hydrology*.
- Conn, A.R., Gould, N., Toint, P.L., 1997. A Globally Convergent Augmented Lagrangian Barrier Algorithm for Optimization with General Inequality Constraints and Simple Bounds. *Mathematics of Computation* 66, 261–288.
- Cybenko, G., 1989. Approximation by Superpositions of a Sigmoidal Function. *Mathematics of Control, Signals, and Systems* 2, 303 – 314.
- Dantzig, G.B., 1963. *Linear Programming and Extensions*. Princeton University Press, Princeton.
- DIN 19700, 2004. Stauanlagen. Teil 11, Talsperren. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.
- Dölling, O.R., Varas, E.A., 2004. Decision support model for operation of multi-purpose water resources systems. *Journal of Hydraulic Research* 2, 115–124.
- Draper, A.J., Munévar, A., Arora, S.K., Reyes, E., Parker, N.L., Chung, F.I., Peterson, L.E., 2004. CalSim: Generalized Model for Reservoir System Analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management* 130, 480–489.
- Driefert, K., 2011. Die Einwohnerzahl wird in weiten Teilen Niedersachsens weiter zurückgehen – Ergebnisse der regionalisierten Bevölkerungsvorausberechnung –. Statistische Monatshefte Niedersachsen.
- Duan, Q., Sorooshian, S., Gupta, V., 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research* 28, 1015.
- Dutta, D., Herath, S., Musiak, K., 2000. Flood inundation simulation in a river basin using a physically based distributed hydrologic model. *Hydrological Processes* 14, 497–519.

- DVWK, 1985. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau: Mitteilungen 10. Ökonomische Bewertung von Hochwasserschutzwirkungen. Arbeitsmaterialien zum methodischen Vorgehen. Bonn.
- Eggelsmann, F., Lange, A., 2011. Der Wasserhaushalt des Westharzes. Hydrologische Untersuchungen 1941-2010. Harzwasserwerke GmbH.
- Eisenmenger, M., Pötzsch, O., Sommer, B., 2006. Bevölkerung Deutschlands bis 2050. 11. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung. Statistisches Bundesamt.
- Enke, W., Deutschländer, T., Schneider, F., Kuchler, W., 2005b. Results of five regional climate studies applying a weather pattern based downscaling method to ECHAM4 climate simulation. *Meteorologische Zeitschrift* 14.
- Enke, W., Schneider, F., Deutschländer, T., 2005. A novel scheme to derive optimized circulation pattern classifications for downscaling and forecast purposes. *Theor. Appl. Climatol.* 82, 51–63.
- Enke, W., Spekat, A., 1997. Downscaling Climate Model Outputs Into Local and Regional Weather Elements by Classification and Regression. *Climate Research* 8, 195 – 207.
- Eum, H.-I., Arunachalam, V., Simonovic, S., 2009. Integrated Reservoir Management System for Adaptation to Climate Change Impacts in the Upper Thames River Basin. *Water Resources Research Report*.
- Eum, H.-I., Vasan, A., Simonovic, S., 2012. Integrated Reservoir Management System for Flood Risk Assessment Under Climate Change. *Water Resources Management* 26, 3785–3802.
- Eurostat, International Monetary Fund, Organisation for Economic Co-operation and Development, United Nations, 1993. *System of National Accounts 1993*.
- Evans, J., Schreider, S., 2002. Hydrological Impacts of Climate Change on Inflows to Perth, Australia. *Climatic Change* 55, 361 – 393.
- FAZ, 1996. Die Harzwasserwerke werden verkauft. Die Preussen Elektra führt das Übernahme konsortium. *Frankfurter Allgemeine* S.7.
- Ferreira, A.R., Teegavarapu, R.S.V., 2011. Optimal and Adaptive Operation of a Hydropower System with Unit Commitment and Water Quality Constraints. *Water Resources Management* 26, 707–732.
- Flato, G.M., Boer, G.J., Lee, W.G., McFarlane, N.A., Ramsden, D., Reader, M.C., Weaver, A.J., 2000. The Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis global coupled model and its climate. *Climate Dynamics* 16, 451 – 467.
- Fleming, S.W., Weber, F.A., 2012. Detection of long-term change in hydroelectric reservoir inflows: Bridging theory and practise. *Journal of Hydrology* 470–471, 36–54.
- Förster, K., 2013. Detaillierte Nachbildung von Schneeprozessen in der hydrologischen Modellierung (Dissertation). Leichtweiß-Institut der Technischen Universität Braunschweig, Abteilung Hydrologie und Wasserwirtschaft, Braunschweig.
- Förster, K., Gelleszun, M., Meon, G., 2012. A weather dependent approach to estimate the annual course of vegetation parameters for water balance simulations on the meso- and macroscale. *Advances in Geosciences* 10.
- Fourastie, J., 1954. Die große Hoffnung des 20. Jahrhunderts. (great hope of the 20iest century). Köln.
- GFWH, 1908a. Die Organisation der Gesellschaft zur Förderung der Wasserwirtschaft im Harze. (No. 8), Veröffentlichungen der Gesellschaft zur Förderung der Wasserwirtschaft im Harze. Braunschweig.
- GFWH, 1908b. Protokoll der am 30. Juni 1908 in Bad Harzburg stattgehabten III. Generalversammlung der Gesellschaft zur Förderung der Wasserwirtschaft im Harze, Veröffentlichungen der Gesellschaft zur Förderung der Wasserwirtschaft im Harze. Braunschweig.
- GFWH, 1905. Stauweiher im Harze. Bericht über die am 11. Januar 1905 in Braunschweig stattgehabte Versammlung. Braunschweig.
- GFWH, 1911. Protokoll der am 14. Juni 1911 in Braunschweig stattgehabten V. Generalversammlung der Gesellschaft zur Förderung der Wasserwirtschaft im Harze. (No. 11), Veröffentlichungen der Gesellschaft zur Förderung der Wasserwirtschaft im Harze. Gesellschaft zur Förderung der Wasserwirtschaft im Harze., Braunschweig.

- Giesecke, J., Mosonyi, E., 2009. Wasserkraftanlagen. Planung, Bau und Betrieb, 5th ed. Springer, Heidelberg Dordrecht London New York.
- Gocht, M., 2013b. Ein einfaches Verfahren zur Wertermittlung in Hochwasserrisikoanalysen. *Wasserwirtschaft* 9, 36–41.
- Gocht, M., 2008. Optimierung von wasserwirtschaftlichen Systemen (Skript für den bilingualen Fernstudiengang ProWater - Nachhaltiges Management und Schutz von Gewässern). Technische Universität Braunschweig, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Braunschweig.
- Gocht, M., Meon, G., 2010. Transnationale Expositionsanalyse für Nutzen-Kosten-Untersuchungen, in: Nachhaltige Wasserwirtschaft Durch Integration von Hydrologie, Hydraulik, Gewässerschutz Und Ökonomie. Beiträge Zum Tag Der Hydrologie Am 25./26. März 2010 an Der Technischen Universität Braunschweig. Forum Für Hydrologie Und Wasserbewirtschaftung Band 29. pp. 263–271.
- Gocht, M., Meon, G., 2012. Optimization of multi reservoir system operation under climate change. Proceedings of the Fourth International Conference on Water Resources and Renewable Energy Development in Asia - ASIA 2012, Chiang Mai, Thailand.
- Gocht, M., Schröter, K., Ostrowski, M., Rubin, C., Nachtnebel, H.P., 2009. EWASE - Early Warning Systems Efficiency - Risk Assessment and Efficiency Analysis., in: Proceedings of the European Conference on Flood Risk Management: Research into Practice (Floodrisk 2008), Oxford, UK, 30. September – 02. October. CRC Press Boca Ra-ton... Presented at the Floodrisk 2008, pp. 775–785.
- Green, W.H., Ampt, G.A., 1911. Studies on soil physics. *J. Agric. Sci.* 4, 1 – 24.
- Güntner, A., 2002. Large-Scale Hydrological Modelling in the Semi-Arid North-East of Brazil. Universität Potsdam, Institut für Geoökologie.
- Güntner, A., Bronstert, A., 2004. Representation of landscape variability and lateral redistribution processes for large-scale hydrological modelling in semi-arid areas. *Journal of Hydrology* 297, 136–161.
- Güntner, A., Krol, M.S., Araújo, J.C.D., Bronstert, A., 2004. Simple water balance modelling of surface reservoir systems in a large data-scarce semiarid region / Modélisation simple du bilan hydrologique de systèmes de réservoirs de surface dans une grande région semi-aride pauvre en données. *Hydrological Sciences Journal* 49, 901–918.
- Guo, X., Hu, T., Wu, C., Zhang, T., Lv, Y., 2013. Multi-Objective Optimization of the Proposed Multi-Reservoir Operating Policy Using Improved NSPSO. *Water Resour Manage* 27, 2137–2153.
- Haberlandt, U., Müller, H., van der Heijden, S., Berndt, C., Verworn, A., Wallner, M., Belli, A., Dietrich, J., 2012. Analyse und Aufbereitung von Klimadaten. In: Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (Hrsg.): Globaler Klimawandel - Wasserwirtschaftliche Folgeabschätzungen für das Binnenland. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz Betriebsstelle Hannover-Hildesheim.
- Haberlandt, U., van der Heijden, S., Verworn, A., Dietrich, J., Berndt, C., 2010. Regionalisierung der Klimabeobachtungsdaten für Niedersachsen als Grundlage für mittel- bis großskalige Modellierungen. Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau, Leibniz Universität Hannover.
- Hamon, W.R., 1961. Estimating Potential evapotranspiration. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Hydraulic Division* 87, 107 – 120.
- Hantel, M., Kraus, H., Schönwiese, C.-D., 1987. Climate definition. In: Fischer, G. [Hrsg.], Landolt-Börnstein Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology. Springer, Berlin.
- Hartwich, R., Behrens, J., Eckelmann, W., Haase, G., Richter, R., Roeschmann, G., Schmidt, R., 1998. Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland im Maßstab 1 : 1 000 000 (BÜK 1000). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- Himmelblau, D., 1972. Applied nonlinear programming. McGraw-Hill, New York.
- Holland, J.H., 1992. Adaptation in Natural and Artificial Systems, 2nd ed. Mass. Inst. of Technol., Cambridge.

- Hornik, K., Stinchcombe, M., White, H., 1989. Multilayer feedforward networks are universal approximators. *Neural Networks* 2, 359–366.
- HWW, 1970. Okertalsperre. Harzwasserwerke des Landes Niedersachsen.
- HWW, 1976. Granetalsperre. Harzwasserwerke des Landes Niedersachsen.
- HWW, 1980. Eckertalsperre. Harzwasserwerke des Landes Niedersachsen, Hildesheim.
- HWW, 1985. Innerstetalsperre. Harzwasserwerke des Landes Niedersachsen.
- HWW, 2007. Geschäftsbericht 2007. Harzwasserwerke GmbH, Hildesheim.
- HWW, 2008. Wasser mit Energie. Strom aus Wasserkraft. Harzwasserwerke GmbH.
- HWW, 2011. Geschäftsbericht 2010. Harzwasserwerke GmbH.
- Hydrotec, 2003. Niederschlag-Abfluss-Simulation NASIM. Kurzbeschreibung. Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH.
- IKSR, 2001. Internationale Kommission zum Schutz des Rheins: Übersichtskarten der Überschwemmungsgefährdung und der möglichen Vermögensschäden am Rhein. Abschlußbericht: Vorgehensweise zur Ermittlung der hochwassergefährdeten Flächen, Vorgehensweise zur Ermittlung der möglichen Vermögensschäden.
- IPCC, 2000. Special Report Emissions Scenarios. Summary for Policymakers: A special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Based on a draft prepared by: Nebojs'a Nakic'enovic', Ogunlade Davidson, Gerald Davis, Arnulf Grübler, Tom Kram, Emilio Lebre La Rovere, Bert Metz, Tsuneyuki Morita, William Pepper, Hugh Pitcher, Alexei Sankovski, Priyadarshi Shukla, Robert Swart, Robert Watson, Zhou Dadi. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007. The Physical Science Basis-Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, New York.
- Jacob, D., Göttel, H., Kotlarski, S., Lorenz, P., Sieck, K., 2008. Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. Umweltbundesamt, Dessau-Rosslau.
- Janga Reddy, M., Nagesh Kumar, D., 2007. An efficient multi-objective optimization algorithm based on swarm intelligence for engineering design. *Engineering Optimization* 39, 49–68.
- Jensen, M.E., Rob, D.C.N., Franzoy, C.E., 1969. Scheduling irrigations using climate-crop-soil data (Proceedings), National Conference on Water Resources Engineering of the American Society of Civil Engineers. New Orleans.
- Jolly, W.M., Nemani, R., Running, S.W., 2005. A generalized, bioclimatic index to predict foliar phenology in response to climate. *Global Change Biology* 11, 619–632.
- Jothiprakash, V., Arunkumar, R., 2013. Optimization of Hydropower Reservoir Using Evolutionary Algorithms Coupled with Chaos. *Water Resour Manage* 27, 1963–1979.
- Kiese, M., Leineweber, B., 2001. Risiko einer Küstenregion bei Klimaänderung. Ökonomische Bewertung und räumliche Modellierung des Schadenspotentials in der Unterweserregion. Geographische Arbeitsmaterialien, Band 25 der Abteilung Wirtschaftsgeographie an der Universität Hannover.
- Kleeberg, H.B., Niekamp, C., 1998. Howas_n Benutzerhandbuch. Institut für angewandte Wasserwirtschaft, Universität der Bundeswehr, Neubiberg.
- Kleeberg, H.-B., Øverland, H., 1989. Zur Berechnung des effektiven und abflußwirksamen Niederschlags, Mitt. Inst. F. Wasserwesen der Universität der Bundeswehr 24.
- Klemes, V., 1986. Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrol. Sci, J.* 31, 13 – 24.
- KLIWA, 2006. Kooperationsvorhaben Klimaveränderung und Wasserwirtschaft der Länder Baden-Württemberg und Bayern: Unser Klima verändert sich. Folgen – Ausmaß – Strategien. (Broschüre). Stuttgart.
- Knijff, Van der, J., De Roo, A., 2007. LISFLOOD distributed water balance and flood simulation model. User manual, version January 26.
- Knijff, Van der, J.M., Younis, J., De Roo, A.P.J., 2010. LISFLOOD: a GIS-based distributed model for river basin scale water balance and flood simulation. *International Journal of Geographical Information Science* 24, 189–212.

- Kongjun, T., Vudhivanich, V., 2003. Artificial Neural Networks Model for Multireservoir Water Allocation. *Kasetsart Journal Natural Science*, Volume 037, Page 523 – 533.
- Koschitzki, R., Däbert, A., Jung, H.-U., Rohr-Zänker, R., 2011. Wohnungsmarktbeobachtung 2010/2011: Integrierte Entwicklung von Wohnstandorten und Regionen – Perspektive 2030. NBank, Investitions- und Förderbank des Landes Niedersachsen.
- Koutsoyiannis, D., Efstratiadis, A., Karavokiros, G., 2001. A decision support tool for the management of multi-reservoir systems, in: *Integrated Decision-Making for Watershed Management Symposium*.
- Kreibich, H., Seifert, I., Merz, B., Thielen, A.H., 2010. Development of FLEMOcs – a new model for the estimation of flood losses in the commercial sector. *Hydrological Sciences Journal* 55, 1302–1314.
- Kreye, P., Gocht, M., Förster, K., 2010. Entwicklung von Prozessgleichungen der Infiltration und des oberflächennahen Abflusses für die Wasserhaushaltsmodellierung. *hywa* 54, 268 – 278.
- Kristensen, K., Jensen, S., 1975. A model for estimating actual evapotranspiration from potential evapotranspiration. *Nordic Hydrology* 6, 70 – 88.
- Krol, M., Jaeger, A., Bronstert, A., Kryukow, J., 2001. The Semi-Arid Integrated Model (SIM), a Regional Integrated Model Assessing Water Availability, Vulnerability of Ecosystems and Society in NE-Brazil. *Phys. Chem. Earth* 26.
- Krol, M.S., Vries, M.J., Oel, P.R., Araújo, J.C., 2011. Sustainability of Small Reservoirs and Large Scale Water Availability Under Current Conditions and Climate Change. *Water Resour Manage* 25, 3017–3026.
- Kufeld, M., Schüttrumpf, H., Hausmann, B., Homann, C., 2012. Combining Reliability, Resilience, Vulnerability Criteria and Downstream Flood Risk to Derive Robust Adaptation Strategies of Multi-Reservoir, Multiobjective Water Resources System Operation under Climate Change, in: *Proceedings of the Tenth International Conference on Hydrosience & Engineering. The Water Cycle Under a Changing Climate: Using Hydrosience and Engineering for a Sustainable Future*. Orlando.
- Kumar, D.N., Reddy, M.J., 2006. Ant Colony Optimization for Multi-Purpose Reservoir Operation. *Water Resour Manage* 20, 879–898.
- Kumar, N.D., Raju, K.S., Ashok, B., 2006. Optimal Reservoir Operation for Irrigation of Multiple Crops Using Genetic Algorithms. *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 132, 7.
- LAWA, 2005. Richtlinie für die Gebiets- und Gewässerverschlüsselung" der LAWA.
- Lin, G.-F., Chen, G.-R., Huang, P.-Y., Chou, Y.-C., 2009. Support vector machine-based models for hourly reservoir inflow forecasting during typhoon-warning periods. *Journal of Hydrology* 372, 17–29.
- Liu, D., Guo, S., Chen, X., Shao, Q., Ran, Q., Song, X., Wang, Z., 2011. A macro-evolutionary multi-objective immune algorithm with application to optimal allocation of water resources in Dongjiang River basins, South China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 26, 491–507.
- Lohr, H., 2001. Simulation, Bewertung und Optimierung von Betriebsregeln für wasserwirtschaftliche Speichersysteme (Dissertation). Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Darmstadt.
- Loucks, D.P., Beek, van, E., Stedinger, J.R., Villars, M.T., 2005. *Water Resources Systems Planning and Management. An Introduction to Methods, Models and Applications*, 1st ed. Unesco Publishing.
- Lund, J.R., Guzman, J., 1999. Derived Operating Rules for Reservoirs in Series or in Parallel. *J. WaterResour. Plan. Manag.* 125(3), 143–153.
- Lutz, W., 1984. Berechnung von Hochwasserabflüssen unter Anwendung von Gebietskenngrößen. Universität Karlsruhe, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft.
- Lutz, W., Sanderson, W., Scherbov, S., Goujon, A., 1996. *The Future Population of the World. What can we assume today?*, 2nd ed. Earthscan, London.
- Maniak, U., 1985. Optimale Nutzung des Wasserdargebotes des Westharzes unter Berücksichtigung der Abflussbedingungen im Vorharzgebiet. Leichtweiß-Institut der Technischen Universität Braunschweig, Bteilung Hydrologie und Wasserwirtschaft.

- Maniak, U., 2005. Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure., 5th ed. Springer, Berlin.
- Maniak, U., Riedel, G., Weihrauch, A., Brinck, S., 2002. Water resources management in the marsh land of the Weser estuary, IHP/OHP Berichte.
- Maniak, U., Seeger, D., 1988. Optimierung des Verbundbetriebs der Nordgruppe der Talsperren im Westharz.
- Markstrom, L., Niswonger, R.G., Regan, R.S., Prudic, D.E., Barlow, P.M., 2008. GSFLOW—Coupled Ground-Water and Surface-Water Flow Model Based on the Integration of the Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS) and the Modular Ground-Water Flow Model (MODFLOW-2005). U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-D1.
- Martz, L.W., Garbrecht, J., 1993. Automated Extraction of Drainage Network and Watershed data from Digital Elevation Models. JAWRA Journal of the American Water Resources Association 29, 901–908.
- Maurer, E.P., 2007. Uncertainty in hydrologic impacts of climate change in the Sierra Nevada, California, under two emissions scenarios. Climatic Change 82, 309–325.
- Maurer, E.P., Hidalgo, H.G., 2008. Utility of daily vs. monthly large-scale climate data: an intercomparison of two statistical downscaling methods. Hydrol. Earth Syst. Sci. 12, 551–563.
- Maurer, T., 1997. Physikalisch begründete zeitkontinuierliche Modellierung des Wassertransports in kleinen ländlichen Einzugsgebieten. Universität Karlsruhe, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Karlsruhe.
- Meier-Hilbert, G., 2012. Talsperren im Harz. Hochwasserschutz und Trinkwasserbereitstellung. In Jörg-Friedhelm Venzke (Hrsg.): Nordwestdeutschland 2037 - Niedersachsen und Bremen in 25 Jahren. Wissenschaftliche Visionen und Essays, Hannoversche Geographische Arbeiten.
- Meise, J., Volwahn, A., 1980. Stadt- und Regionalplanung. Ein Methodenhandbuch. Vieweg, Braunschweig.
- Menzel, A., 2007. Phänologische Modelle. Promet 33, 20 – 27.
- Meon, G., Förster, K., Gelleszun, M., Riedel, G., 2012. Zukünftige Entwicklung von Wasserhaushalt und Hochwasser. In: Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (Hrsg.): Globaler Klimawandel - Wasserwirtschaftliche Folgeabschätzungen für das Binnenland. (No. 33), Oberirdische Gewässer. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz Betriebsstelle Hannover-Hildesheim.
- Meon, G., Gocht, M., 2012. Minimization of Adverse Climate Change Impacts on Multi-Dam Systems by Optimized Operation. Proceedings of the International Symposium on Dams for a Changing World. International Commission on Large Dams (ICOLD), Kyoto, Japan.
- Meon, G., Maniak, U., Riedel, G., Plogmeier, C., 2007. Operationelle Hochwasservorhersage für mittlere Flussgebiete in Deutschland. Projektstudie für die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. im Auftrag der Bund-Länder Arbeitsgemeinschaft Wasser.
- Merz, B., 2006. Hochwasserrisiken. Schweizerbart, Stuttgart.
- Merz, B., Bittner, R., Grünewald, U., Piroth, K., 2011b. Management von Hochwasserrisiken : mit Beiträgen aus den RIMAX-Forschungsprojekten. Schweizerbart, Stuttgart.
- Merz, B., Gocht, M., 2001. Risikoanalyse Seckach-Kirnau. Teil II: Ermittlung von Schadenpotentialen, Nutzen-Kosten-Analyse. Gutachten im Auftrag des Zweckverbandes Hochwasserschutz Einzugsbereich Seckach/Kirnau.
- Merz, R., Parajka, J., Blöschl, G., 2009. Scale effects in conceptual hydrological modeling. Water Resour. Res. 45.
- Merz, R., Parajka, J., Blöschl, G., 2011. Time stability of catchment model parameters: Implications for climate impact analyses. Water Resour. Res. 47.
- Mockus, V., 1972. National Engineering Handbook, Section 4, Hydrologie. Chapter 21. Design Hydrographs. US Soil Conservation Service.

- Monteith, J.L., 1965. Evaporation and environment. Presented at the Symp. Soc. Exp. Biol. 19, pp. 205 – 224.
- Morgenschweis, G., Strassen, zu, G., Schwanenberg, D., 2006. Abschätzung der Auswirkungen von möglichen Klimaänderungen auf die Bewirtschaftung der Talsperren im Einzugsgebiet der Ruhr, Jahresbericht Ruhrwassermenge. Ruhrverband, Essen.
- Morgenschweis, G., Strassen, zur, G., Schwanenberg, D., 2008. Reichen die vorhandenen Talsperrenkapazitäten im Einzugsgebiet der Ruhr für eine sichere Wasserversorgung? Korrespondenz Wasserwirtschaft 1, 192 – 199.
- Müller, R., Lennartz, F., 2011. Wasserhaushalt im Einzugsgebiet von Talsperren - Multikriterielle Optimierung von Talsperrenverbundsystemen unter veränderten klimatischen Randbedingungen (Poster), Entwicklung und Erprobung eines Integrierten Regionalen Klimaanpassungsprogramms für die Modellregion Dresden - RegKlam. Technische Universität Dresden,.
- MURL, 2000. Hochwasserschadenspotenziale am Rhein in Nordrhein-Westfalen, Abschlussbericht. Düsseldorf.
- Nash, J.E., 1957. The form of instantaneous unit hydrograph. Int. Assn. Sci. Hydro. Publ. 51, 546 – 557.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. Journal of Hydrology 10, 282–290.
- Nilson, E., Krahe, P., Tomassini, L., Jacob, D., 2009. Zweite Realisation des Regionalen Klimamodells REMO als Beitrag zur Schaffung von Entscheidungsgrundlagen für das Wasserstraßenmanagement (kurz: REMO-BFG). Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- NMELF, 1983. Flächenverzeichnis zur Hydrographischen Karte Niedersachsen. Der Niedersächsische Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten.
- O'Brien, T.A., Sloan, L.C., Snyder, M.A., 2010. Can ensembles of regional climate model simulations improve results from sensitivity studies? Climate Dynamics 37, 1111–1118.
- OECD, 2010. STAN Database for Structural Analysis <http://stats.oecd.org/Index.aspx>.
- Oliveira, R., Loucks, D.P., 1997. Operating rules for multireservoir systems. Water Resour. Res. 33, 839.
- Ostadrahimi, L., Mariño, M.A., Afshar, A., 2011. Multi-reservoir Operation Rules: Multi-swarm PSO-based Optimization Approach. Water Resources Management 26, 407–427.
- Othman, F., Naseri, M., 2011. Reservoir inflow forecasting using artificial neural network. International Journal of the Physical Sciences Vol 6(3), 434 – 440.
- Petrow, T., Merz, B., 2009. Trends in flood magnitude, frequency and seasonality in Germany in the period 1951–2002. Journal of Hydrology 371, 129–141.
- Rajagopalan, B., Nowak, K., Prairie, J., Hoerling, M., Harding, B., Barsugli, J., Ray, A., Udall, B., 2009. Water supply risk on the Colorado River: Can management mitigate? Water Resour. Res. 45.
- Rani, D., Moreira, M.M., 2009. Simulation–Optimization Modeling: A Survey and Potential Application in Reservoir Systems Operation. Water Resour Manage 24, 1107–1138.
- Recken, L., Dennecke, N.N., Quirll, N.N., 1895. Erläuterungsbericht zum generellen Projekt einer Talsperre im Sösetale bei Osterode am Harz. (No. 2), Veröffentlichungen der Gesellschaft zur Förderung der Wasserwirtschaft im Harze. Veröffentlichungen der Gesellschaft zur Förderung der Wasserwirtschaft im Harze, Braunschweig.
- Reddy, M.J., Kumar, D.N., 2007. Multiobjective Differential Evolution with Application to Reservoir System Optimization. J. Comp. in Civ. Engrg. 21, 136.
- Reis, L.F.R., Bessler, F.T., Walters, G.A., Savic, D., 2006. Water Supply Reservoir Operation by Combined Genetic Algorithm – Linear Programming (GA-LP) Approach. Water Resour Manage 20, 227–255.
- Richards, L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. Physics 1, 318–333.
- Richtlinie 2000/60/EG, n.d. RichtlinieE 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik.

- Richtlinie 2007/60/EG, n.d. Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken.
- Riedel, G., 2003. Naxos Niederschlag-Abfluss-Modell für X-Operations-Systeme. Benutzerhandbuch Demo-version 1.21. Technische Universität Braunschweig, Leichtweiß-Institut für Wasserbau.
- Riedel, G., 2004. Ein hydrologisches Modell für tidebeeinflusste Flussgebiete. Technische Universität Braunschweig.
- Riedel, G., 2006. Das Modellsystem NAXOS/PRAEDICT - Simulationsmodelle für die Hochwasservorhersage. Europäisches Bildungszentrum für Wasser, Energie und Abfall, Sofia/Bulgarien.
- Riedel, G., Meon, G., Förster, K., Lange, S., Liechtenberg, T., Anhalt, M., 2011. *Panta Rhei - Hydrologisches Modellsystem für Forschung und Praxis in Niedersachsen*, Hydrologie und Wasserwirtschaft - von der Theorie zur Praxis. Beiträge zum Tag der Hydrologie am 24./25. März 2011 an der Technischen Universität Wien.
- Roeckner, E., Bäuml, G., Bonaventura, L., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., Hagemann, S., Kirchner, I., Kornblueh, L., Manzini, E., Rhodin, A., Schlese, U., Schulzweida, U., Tompkins, A., 2003. The atmospheric general circulation model ECHAM5 - Part 1: Model Description (No. 349). Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg.
- Roeckner, E., Brasseur, G.P., Giorgetta, M., Jacob, D., Jungclaus, J., Reick, C., Sillmann, J., 2006. Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg.
- Rumelhart, D.E., Hinton, G.E., Williams, R.J., 1986. Learning representations by back-propagating errors. *Nature* 323, 533–536.
- Sachs, L., 2006. *Angewandte Statistik. Anwendung statistischer Methoden.*, 12th ed. Springer, Berlin, Heidelberg, New York,.
- Schmidt, M., 1991. Hochwasser und Typhus gaben den Anstoß. Überregionale Wasserwirtschaft zum Wohle des Harzvorlandes. In: *Jahrbuch 1991 des Landkreises Hildesheim* 16.
- Schröter, K., Gocht, M., Ostrowski, M., Nachtnebel, H.-P., Kahl, B., Corral, C., Sempere-Torres, D., 2009. EWASE—Early Warning Systems Efficiency: Evaluation of flood forecast reliability, in: *Proceedings of the European Conference on Flood Risk Management: Research into Practice (Floodrisk 2008)*, Oxford, UK, 30. September – 02. October. CRC Press Boca Ra-ton... . Presented at the Floodrisk 2008, pp. 755–765.
- Schulla, J., 1997. Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich.
- Sedki, A., Ouazar, D., El Mazoudi, E., 2009. Evolving neural network using real coded genetic algorithm for daily rainfall–runoff forecasting. *Expert Systems with Applications* 36, 4523–4527.
- Seifert, I., Kreibich, H., Merz, B., Thielen, A.H., 2010. Application and validation of FLEMOcs – a flood-loss estimation model for the commercial sector. *Hydrological Sciences Journal* 55, 1315–1324.
- Seifert, I., Thielen, A.H., Merz, M., Borst, D., Werner, U., 2009. Estimation of industrial and commercial asset values for hazard risk assessment. *Natural Hazards* 52, 453–479.
- Sharif, M., Burn, D.H., 2006. Simulating climate change scenarios using an improved K-nearest neighbor model. *Journal of Hydrology* 325, 179–196.
- Sherman, L.K., 1932. Streamflow from rainfall by the unit-graph method. *Eng. News-Rec.* 108, 501 – 505.
- Spekat, A., Enke, W., Kreienkamp, F., 2007. Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES- Szenarios B1, A1B und A2, Publikationen des Umweltbundesamtes. Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH.
- Sreekanth, J., Datta, B., Mohapatra, P.K., 2012. Optimal Short-term Reservoir Operation with Integrated Long-term Goals. *Water Resources Management*.

- Statistisches Bundesamt, 2003. Klassifikation der Wirtschaftszweige mit Erläuterungen. Ausgabe 2003. Wiesbaden.
- Stemplewski, J., Becker, M., Pfister, A., 2008. Antworten der Wasserwirtschaft auf den Klimawandel – Strategien für die Flussgebiete von Emscher und Lippe. *Korrespondenz Wasserwirtschaft* 1, 427 – 434.
- Strickler, A., 1923. Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauigkeitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen, Mitteilungen des Amtes für Wasserwirtschaft. Eidg. Amt für Wasserwirtschaft, Bern.
- Suykens, J.A.K., Gestel, T., Brabanter, J., De Moor, B., vandewalle, J., 2002. Least Squares Support Vector Machines, 1st ed. World Scientific, Singapore New Jersey London ...
- Teicke, J., 2011. Unesco Welterbe Oberharzer Wasserregal. Harzwasserwerke GmbH, Claustahl-Zellerfeld.
- Thieken, A.H., Seifert, I., Merz, B., 2010. Hochwasserschäden: Erfassung, Abschätzung und Vermeidung. Oekom Verlag GmbH.
- Thorntwaite, C.W., 1948. An Approach towards a Rational Classification of Climate. *Geographical Review* 38, 55.
- Todini, E., 1996. The ARNO rainfall—runoff model. *Journal of Hydrology* 175, 339–382.
- Tonn, R., 1982. Ungewöhnliche Hochwässer aus dem Harz. *Neues Archiv für Niedersachsen* 31, 113 – 125.
- United Nations, 1999. Long-Range World Population Projections: Based on the 1998 Revision. New York.
- USACE, 1987. SSARR - Model Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation. US Army Corps of Engineers, North Pacific Division.
- USDA, 1986. Urban Hydrology for Small Watersheds. USDA.
- Vapnik, V.N., 1999. An overview of statistical learning theory. *IEEE Trans. Neural Netw.* 10, 988–999.
- Vereinte Nationen, 2002. International Standard Industrial Classification of All Economic Activities (ISIC). Statistical Papers Series M, No. 4, Rev.3.1.
- Verordnung 1059/2003/EG, n.d. Verordnung (EG) Nr. 1059/2003 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Mai 2003 über die Schaffung einer gemeinsamen Klassifikation der Gebiets-einheiten für die Statistik (NUTS).
- Verordnung 2223/1996/EG, n.d. Verordnung (EG) Nr. 2223/1996 Des Rates vom 25. Juni 1996 zum Europäischen System Volkswirtschaftlicher Gesamtrechnungen auf nationaler und regionaler Ebene in der Europäischen Gemeinschaft.
- Verordnung 29/2002/EG, n.d. Verordnung (EG) Nr. 29/2002 Der Kommission vom 19. Dezember 2001 zur Änderung der Verordnung (EWG) Nr. 3037/90 des Rates betreffend die statistische Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft.
- Vicuña, S., Dracup, J.A., Dale, L., 2011. Climate change impacts on two high-elevation hydropower systems in California. *Climatic Change* 109, 151–169.
- Wagner, M., Schmidt, C., Schwarze, R., 2009. Untersuchungen zu möglichen Veränderungen des Hochwasserregimes der Elbe unter Berücksichtigung des Klimawandels und der Steuerung ausgewählter Stauanlagen, Wirkungen des globalen Wandels auf den Wasserkreislauf im Elbegebiet - GLOWA Elbe. Technische Universität Dresden,.
- Werner, P.C., Gerstengarbe, F.-W., 1997. Proposal for the development of climate scenarios. *Climate Research* 8, 171 – 182.
- Wilson, W.T., 1941. A graphical flood-routing method. *Transactions, American Geophysical Union* 22, 893.
- Xie, P., Arkin, P.A., 1997. Global Precipitation: A 17-Year Monthly Analysis Based on Gauge Observations, Satellite Estimates, and Numerical Model Outputs. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78, 2539 – 2558.
- Yu, P., Chen, S., Chang, I., 2006. Support vector regression for real-time flood stage forecasting. *Journal of Hydrology* 328, 704–716.
- Zimmermann, F., 1941. Talsperrenvoruntersuchungen im Harz. Braunschweig.

13 Anhänge

Anhang 1 Kapitalintensitäten in Euro für Ausrüstungen und Bauten im Kreis Osterode für die Jahre 2005 bis 2009

Ausrüstungen €					
	2005	2006	2007	2008	2009
A	51.201	55.182	67.794	64.824	75.800
B	111.395	146.781	145.630	140.791	162.878
C	15.893	13.870	14.654	14.617	20.946
D	49.803	48.764	50.516	45.148	47.674
E	95.259	82.207	85.191	85.315	115.383
F	23.523	22.506	20.981	20.115	22.240
G	9.087	9.215	9.315	9.545	10.014
H	7.265	7.181	6.957	6.908	6.764
I	46.971	47.047	47.485	48.490	50.375
J	11.873	12.163	10.702	11.167	12.643
K	77.668	77.222	65.844	67.596	78.232
L	33.340	32.342	31.984	34.753	39.008
M	16.573	15.833	15.346	16.343	18.148
N	13.642	13.319	13.194	14.326	16.066
O	32.021	31.042	30.790	33.296	37.402
Bauten €					
	2005	2006	2007	2008	2009
A	82.708	88.675	108.445	104.334	114.476
B	179.943	235.871	232.954	226.601	245.986
C	14.003	12.558	14.046	14.540	20.291
D	43.883	44.152	48.421	44.912	46.184
E	83.936	74.432	81.657	84.868	111.777
F	20.727	20.378	20.111	20.010	21.545
G	90.980	94.889	98.294	100.635	102.267
H	72.738	73.943	73.416	72.828	69.075
I	470.265	484.436	501.097	511.235	514.468
J	118.872	125.246	112.939	117.739	129.121
K	777.599	795.147	694.827	712.681	798.962
L	333.791	333.020	337.511	366.412	398.372
M	165.924	163.026	161.940	172.310	185.336
N	136.578	137.142	139.228	151.041	164.082
O	320.592	319.640	324.914	351.044	381.973

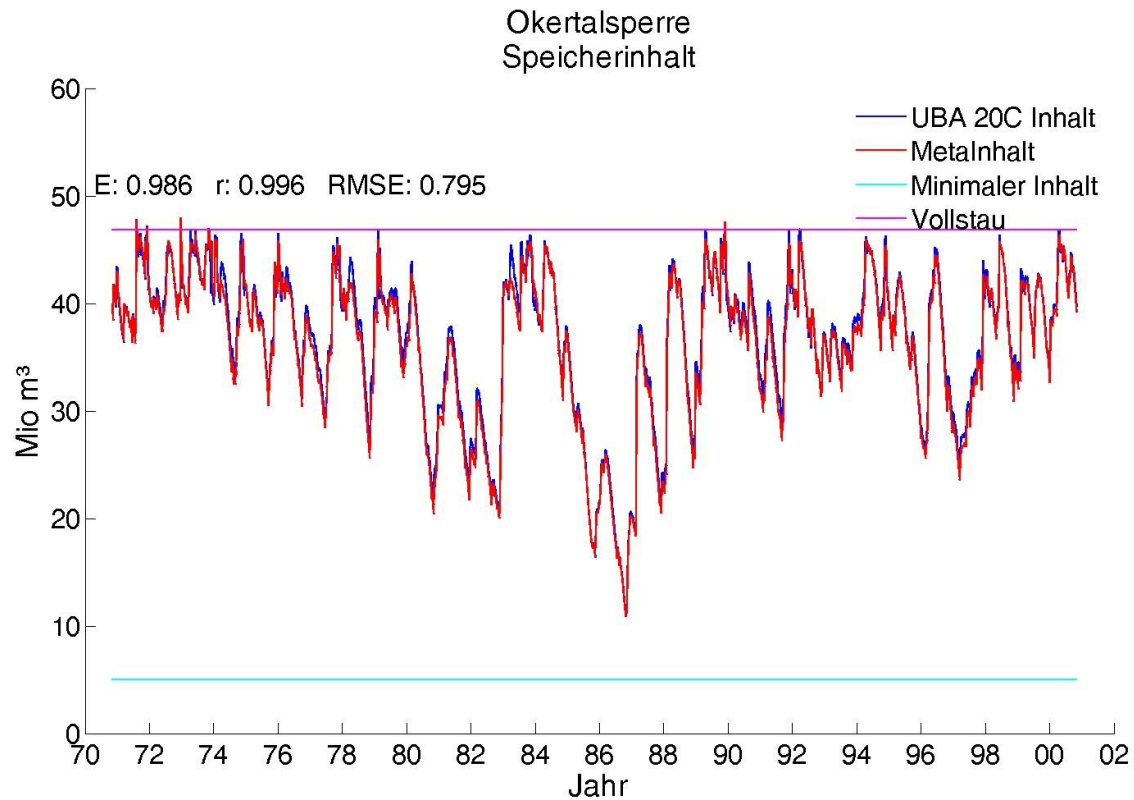
Anhang 2: Abbildungen der Optimierung für Oker- und Innerstetalsperre.

Abbildung A2.1: Mit dem Metamodell berechnete Inhalte der Okertalsperre im Vergleich mit der Berechnung aus PANTA RHEI.

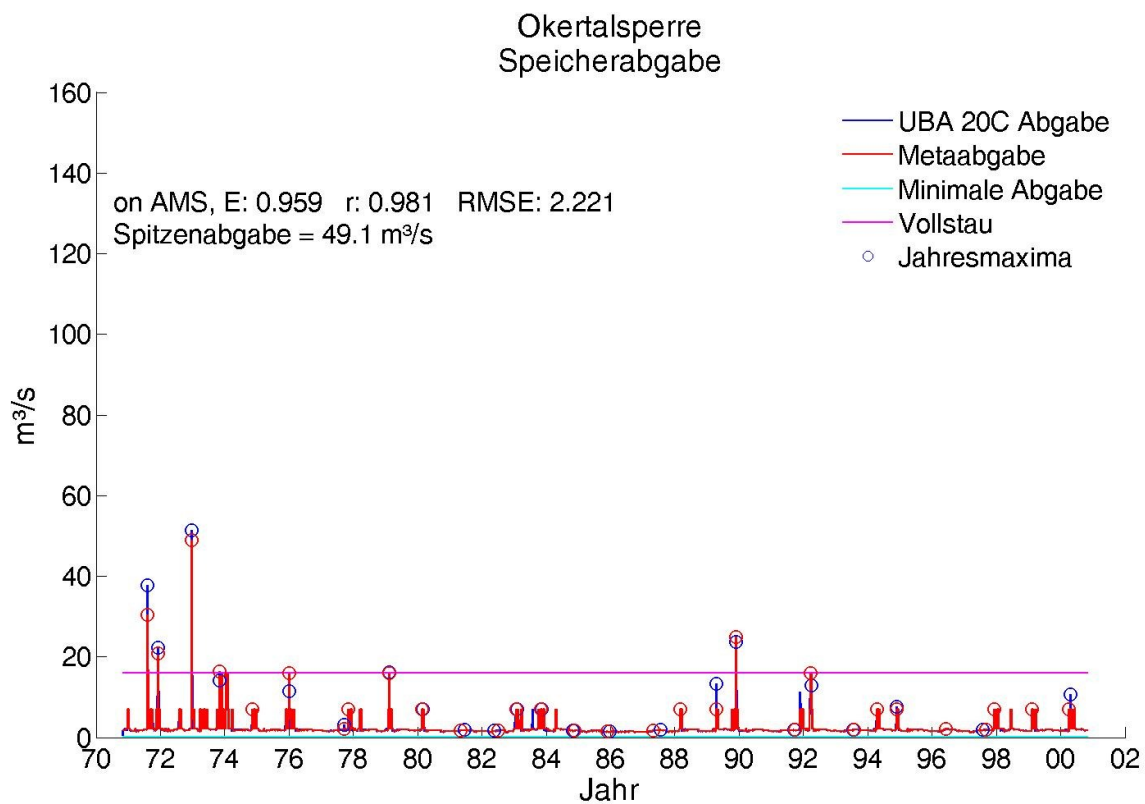


Abbildung A2.2: Mit dem Metamodell berechnete Abgaben der Okertalsperre im Vergleich mit der Berechnung aus PANTA RHEI.

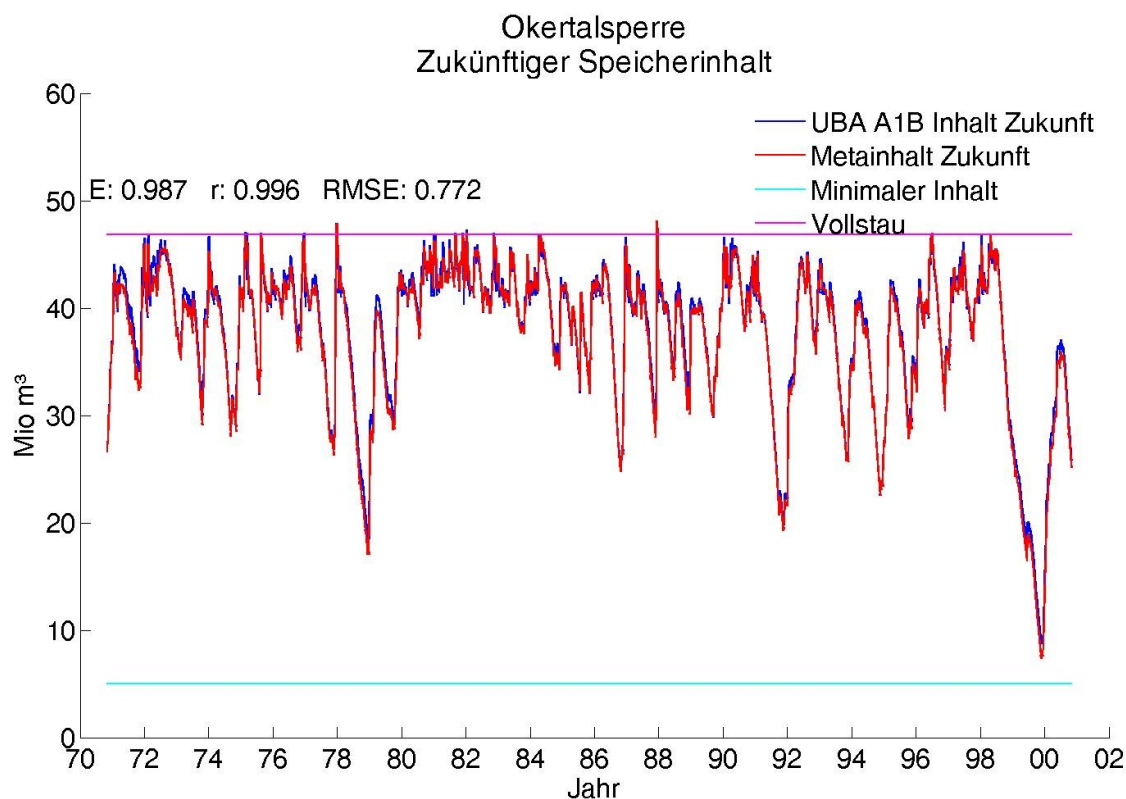


Abbildung A2.3: Mit dem Metamodell berechnete Inhalte der Okertalsperre für die ferne Zukunft 2071 – 2100 im Vergleich mit der Berechnung aus PANTA RHEI.

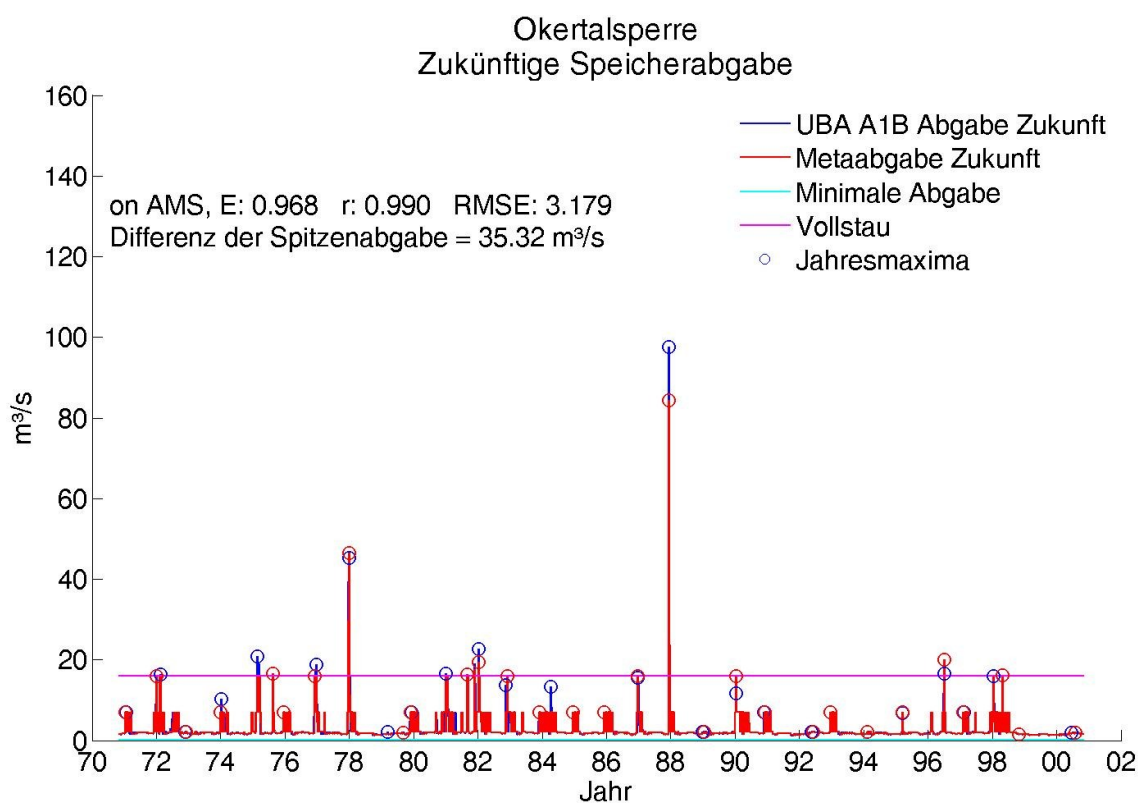


Abbildung A2.4: Mit dem Metamodell berechnete Abgaben der Okertalsperre für die ferne Zukunft 2071 – 2100 im Vergleich mit der Berechnung aus PANTA RHEI.

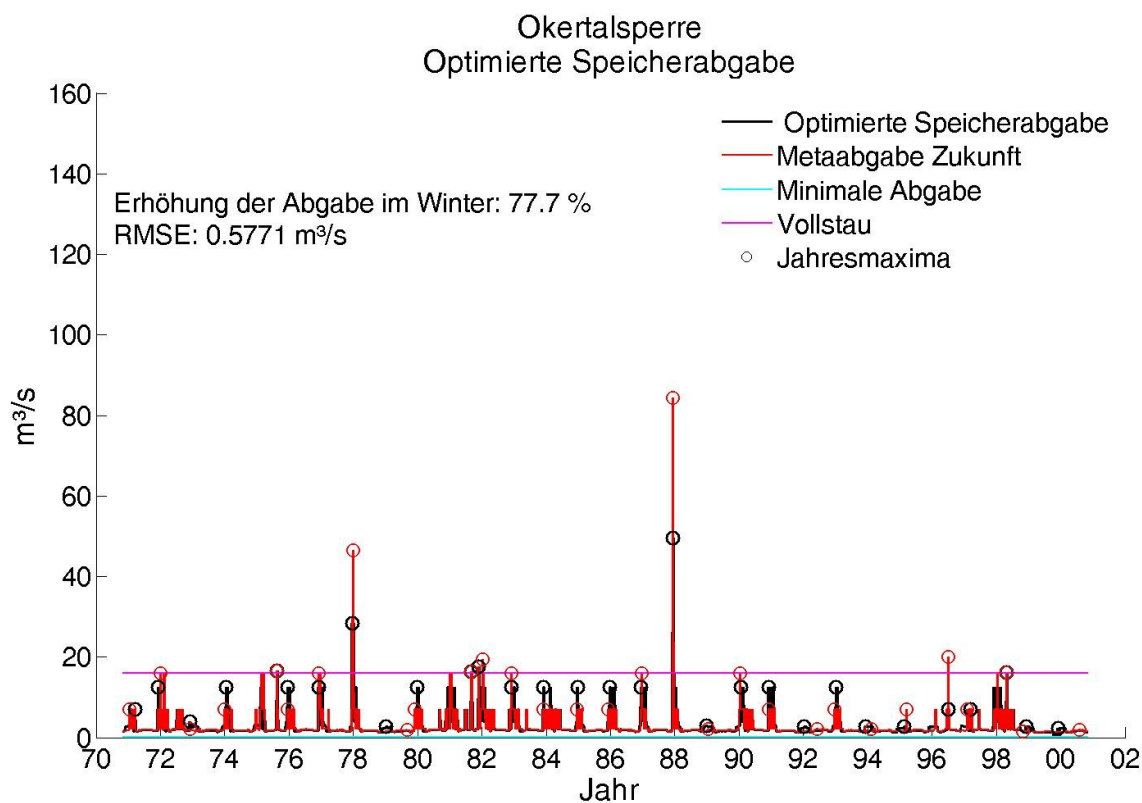


Abbildung A2.5: Optimierte Abgaben der Okertalsperre für die ferne Zukunft im Vergleich mit der Ausgangssituation.

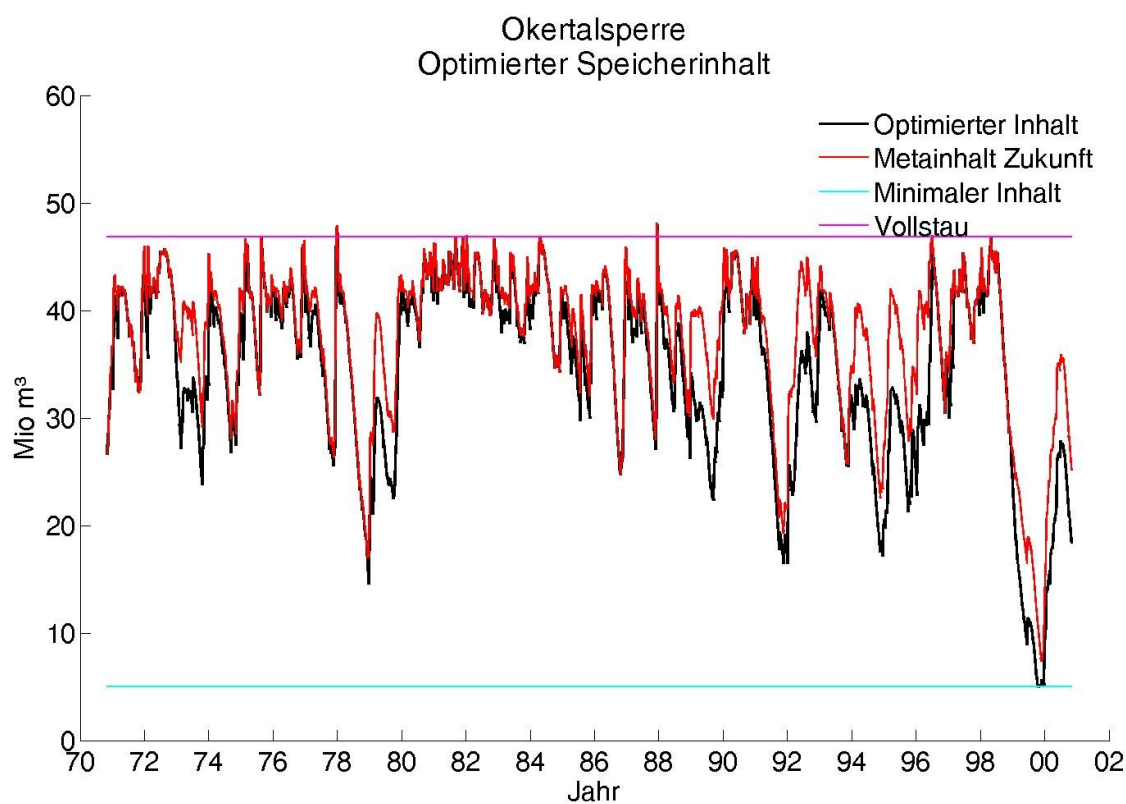


Abbildung A2.6: Auswirkung der optimierten Abgaben der Okertalsperre auf den Speicherinhalt für die ferne Zukunft im Vergleich mit der Ausgangssituation.

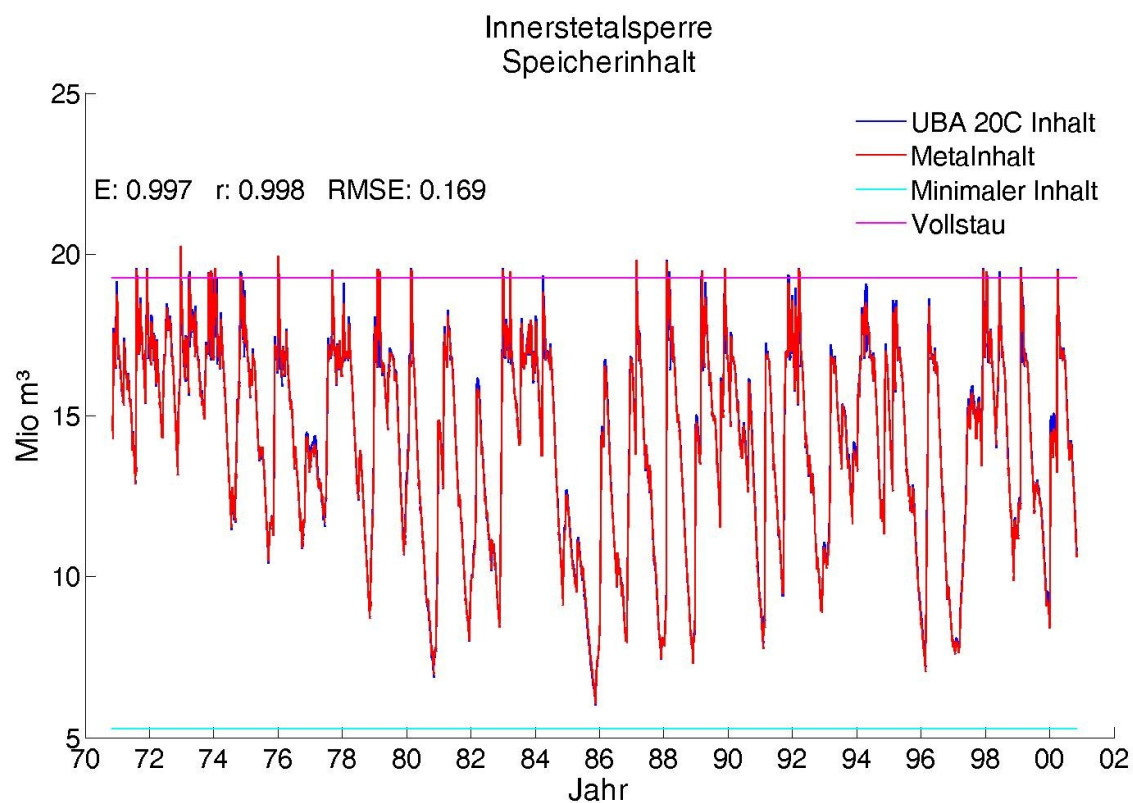


Abbildung A2.7: Mit dem Metamodell berechnete Inhalte der Innerstetalsperre im Vergleich mit der Berechnung aus PANTA RHEI.

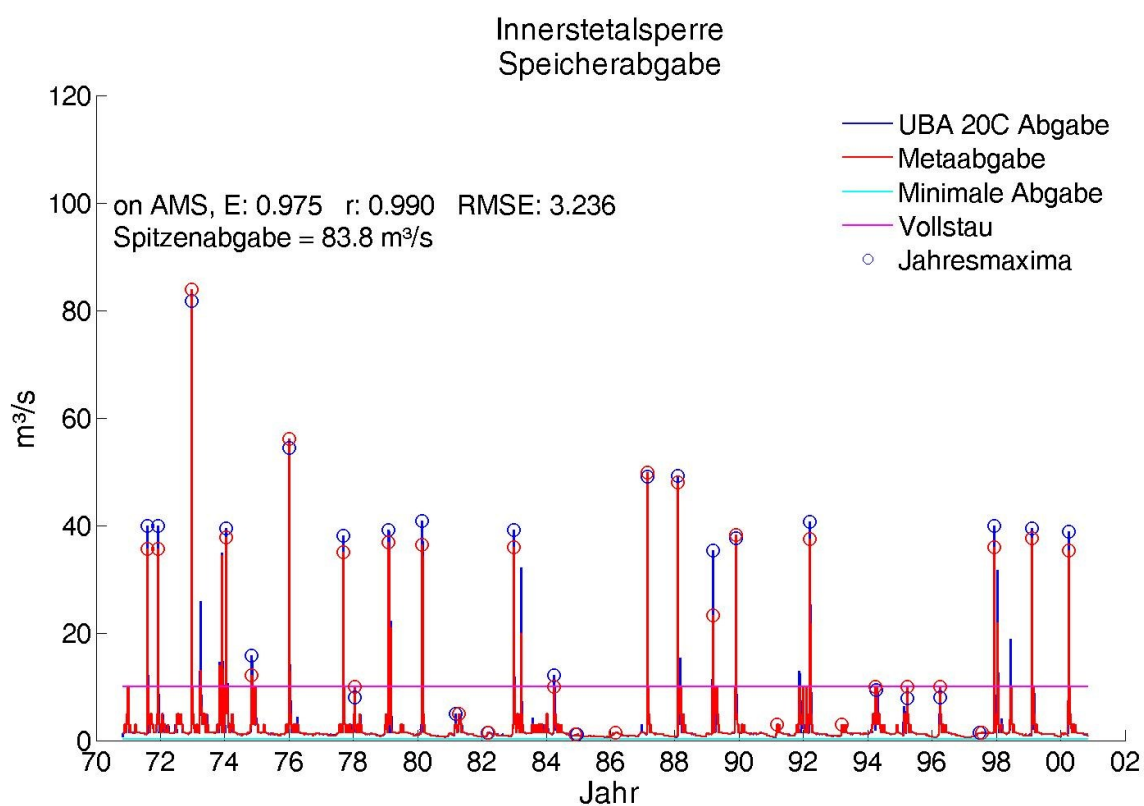


Abbildung A2.8: Mit dem Metamodell berechnete Abgaben der Innerstetalsperre im Vergleich mit der Berechnung aus PANTA RHEI.

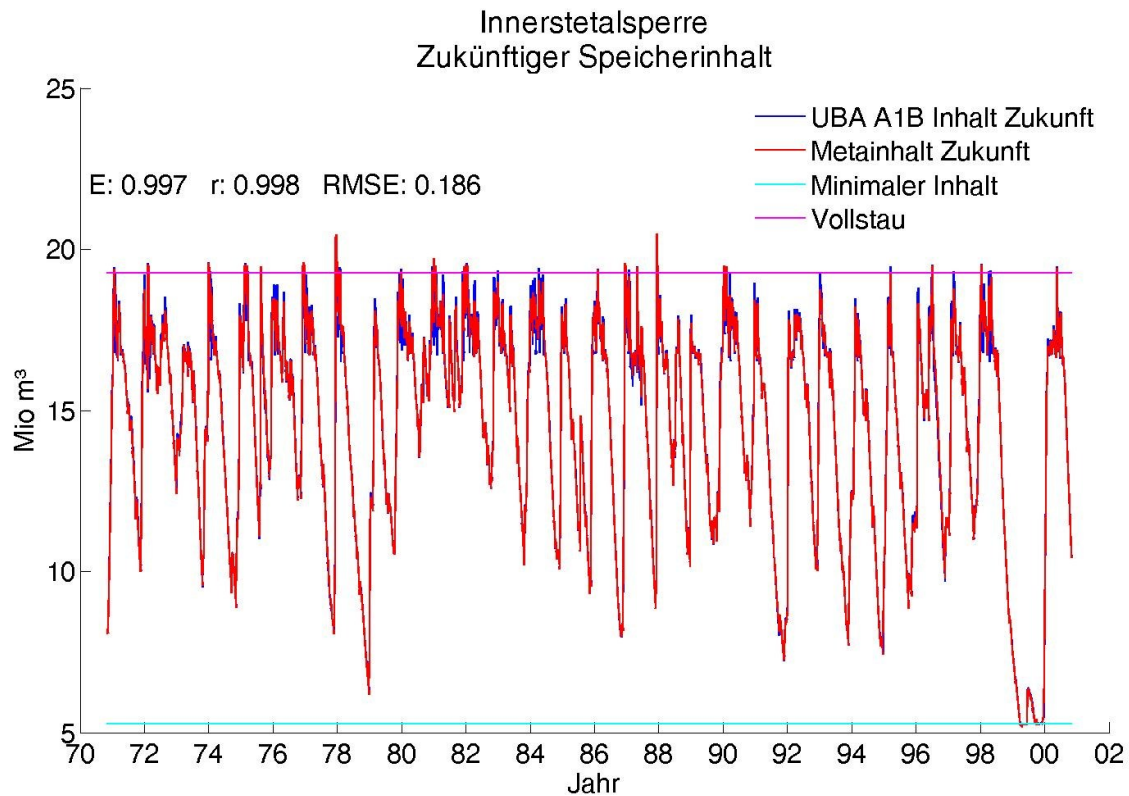


Abbildung A2.9: Mit dem Metamodell berechnete Inhalte der Innerstetalsperre für die ferne Zukunft 2071 – 2100 im Vergleich mit der Berechnung aus PANTA RHEI.

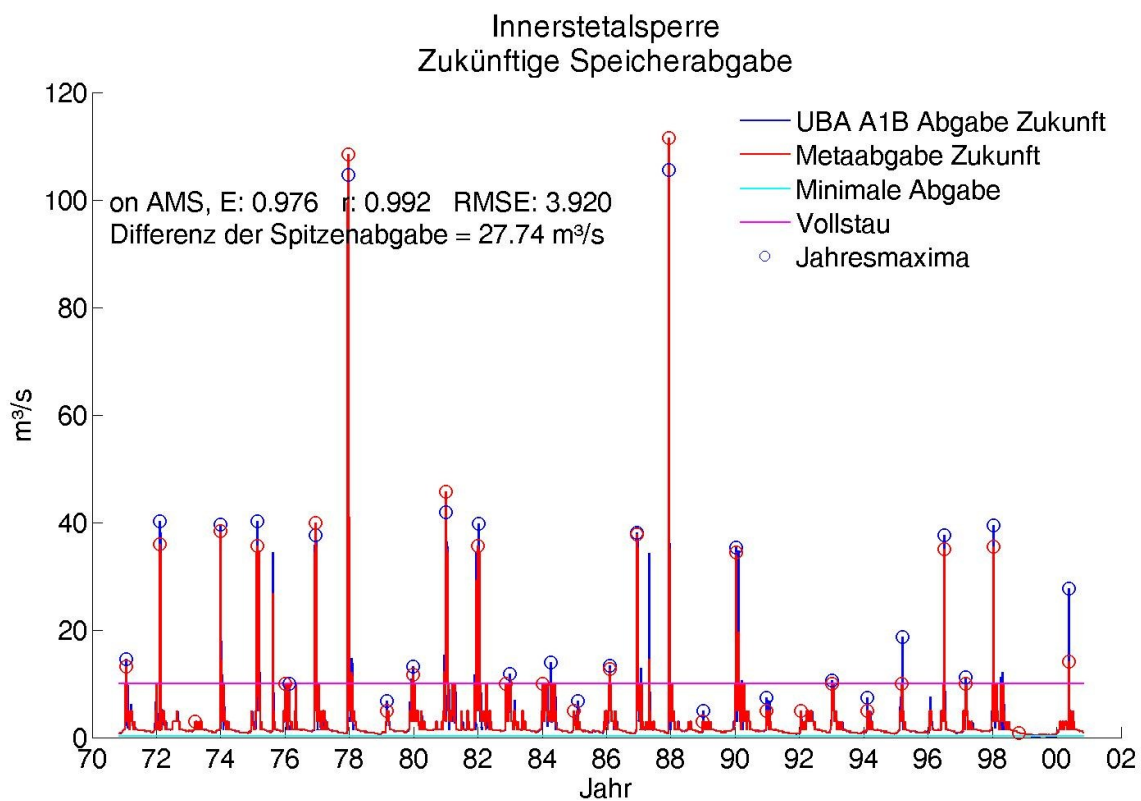


Abbildung A2.10: Mit dem Metamodell berechnete Abgaben der Innerstetalsperre für die ferne Zukunft 2071 – 2100 im Vergleich mit der Berechnung aus PANTA RHEI.

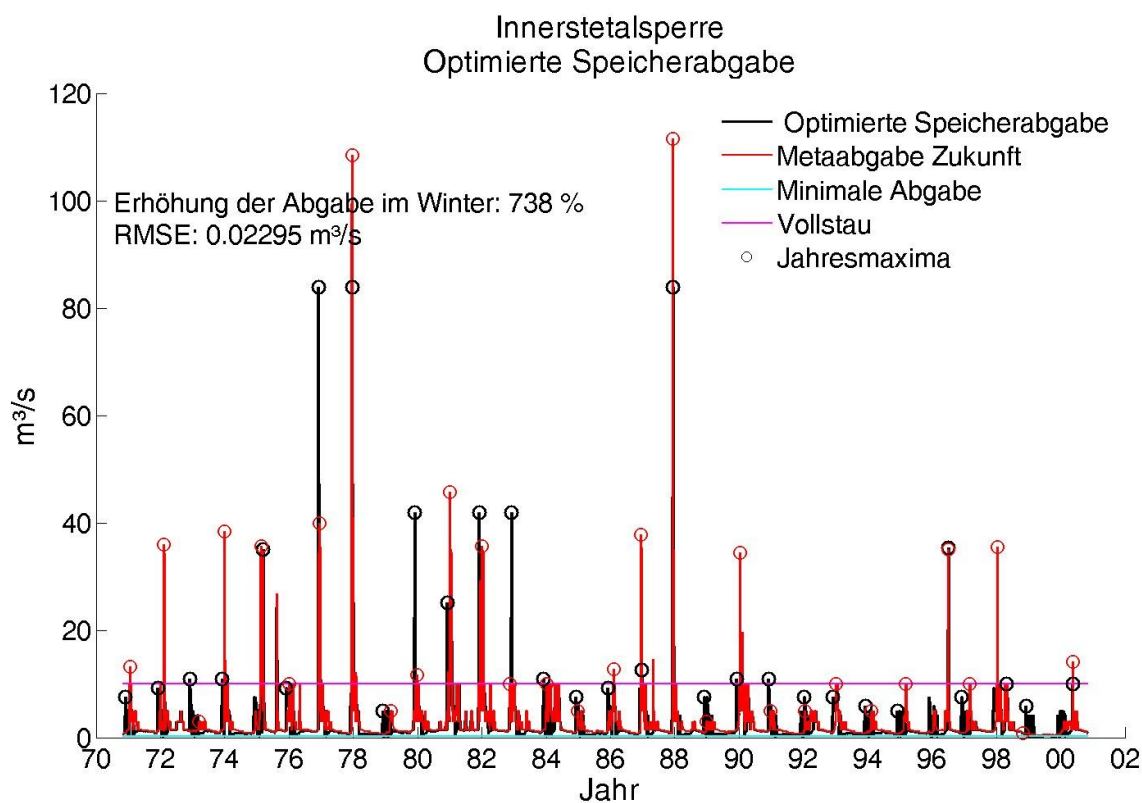


Abbildung A2.11: Optimierte Abgaben der Innerstetalsperre für die ferne Zukunft im Vergleich mit der Ausgangssituation.

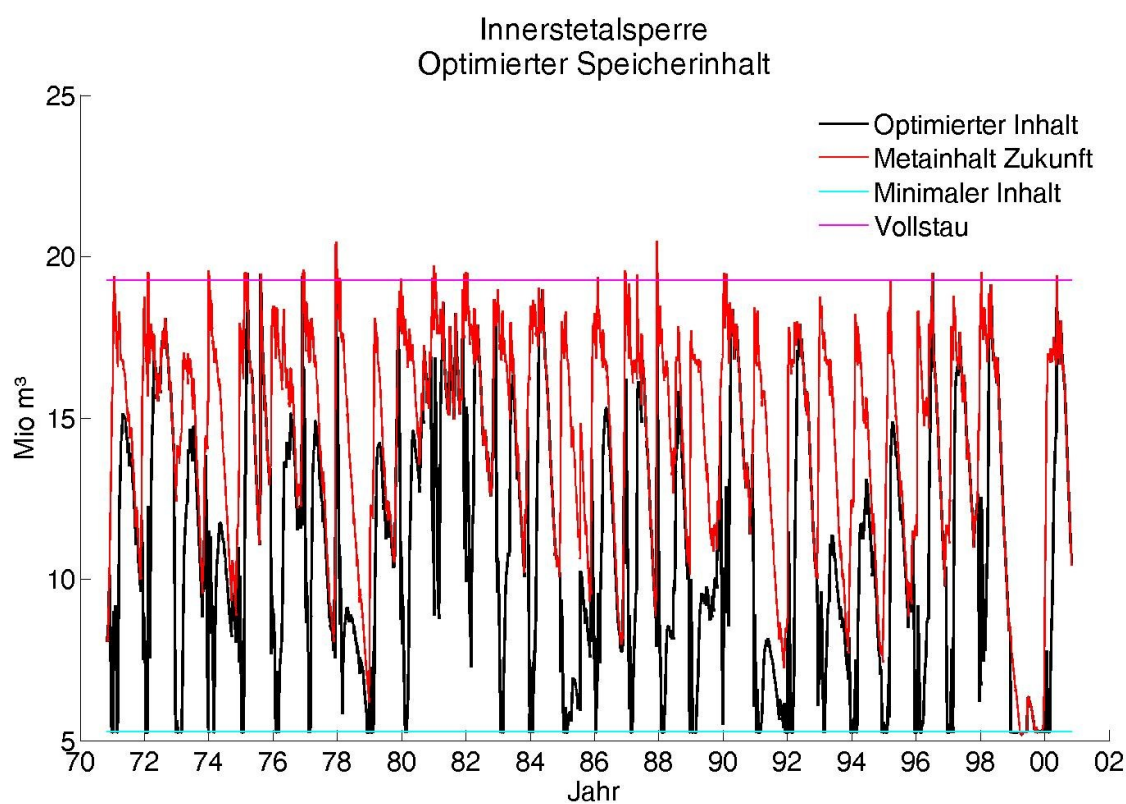


Abbildung A2.12: Auswirkung der optimierten Abgaben der Innerstetalsperre auf den Speicherinhalt für die ferne Zukunft im Vergleich mit der Ausgangssituation.